



**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROYECTO FIN DE CARRERA**

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE UN EJE FISURADO USANDO CÓDIGO NASTRAN

Realizado por:
Alberto Arribas Redondo

DIRIGIDO POR: Juan Carlos García Prada

Junio 2012



*A mi familia y a MARTA,
por su incondicional apoyo y ayuda.*



AGRADECIMIENTOS

La culminación de este proyecto va mas allá de la simple consecución de los objetivos marcados para el mismo. Es el fin de una larga etapa muy enriquecedora de mi vida que ha sido mi paso por la universidad.

Quiero agradecer el apoyo de todas las personas que me han acompañado durante estos años, duros pero inolvidables.

En particular, quiero agradecer a mi familia, y a mi novia Marta, por todo el apoyo y confianza que me han dado durante todo este tiempo. Sin su ayuda, no me cabe duda alguna, no habría terminado esta etapa.

Quiero tener también un cariñoso recuerdo para mis compañeros, con los que he compartido muchas horas estudiando y disfrutando de todos estos años.

Sin olvidarme de mis amigos de Fuenlabrada que también me han ayudado a terminar esta dura etapa de mi vida y espero que sigan en las etapas nuevas que vayan apareciendo en el futuro.

A todos vosotros, muchas gracias.



INDICE

1.	OBJETIVOS.....	1
2.	INTRODUCCIÓN.	1
2.1.	CONCEPTOS PRELIMINARES.....	2
2.1.1.	RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS BAJO CARGAS ESTÁTICAS.	2
2.1.2.	NUCLEACIÓN DE DEFECTOS.....	5
2.1.3.	MÉTODOS DE LOS ELEMENTOS FINITOS (FEM).....	6
2.2.	INTRODUCCIÓN AL CÓDIGO NASTRAN (SOLVER).....	9
2.2.1.	NASTRAN: Conceptos fundamentales.....	9
2.2.2.	NASTRAN: BULK DATA.....	15
2.2.3.	NASTRAN: EXECUTIVE CONTROL STATEMENTS.....	27
2.2.4.	NASTRAN: CASE CONTROL COMMANDS.....	27
3.	DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.....	31
3.1.	CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	31
3.2.	MATERIALES.....	35
4.	DESARROLLO MODELOS FEM Y RESULTADOS.....	36
4.1.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO GLOBAL (GFEM).....	40
4.1.1.	DESCRIPCIÓN MODELO FEM.....	40
4.1.2.	SISTEMA DE COORDENADAS.....	43
4.1.3.	DIMENSIONADO MODELO FEM.....	44
4.1.4.	CARACTERÍSTICAS DEL MODELO (GFEM).....	48
4.1.5.	CARGAS EXTERNAS.....	49
4.1.6.	CONDICIONES DE CONTORNO.....	55
4.1.7.	ANÁLISIS Y RESULTADOS MODELO GLOBAL (GFEM).....	59
4.2.	DESCRIPCIÓN DEL MODELO DETALLADO (DFEM).....	71
4.2.1.	DESCRIPCIÓN MODELO FEM.....	71
4.2.2.	SISTEMA DE COORDENADAS.....	73
4.2.3.	DIMENSIONADO MODELO FEM.....	74
4.2.4.	CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DETALLADO (DFEM).....	76
4.2.5.	CARGAS EXTERNAS Y CONDICIONES DE CONTORNO.....	77
4.2.6.	PROCESO DE ANÁLISIS DEL MODELO DETALLADO.....	86
4.2.7.	ANÁLISIS MODELO DETALLADO, ESTADO I.....	88
4.2.7.1	DEFORMACIÓN.....	89
4.2.7.2	TENSIONES.....	93
4.2.7.3	MODOS PROPIOS.....	95
4.2.8.	ANÁLISIS MODELO DETALLADO, ESTADO II.....	98
4.2.8.1	DEFORMACIÓN.....	100
4.2.8.2	TENSIONES.....	102
4.2.8.3	MODOS PROPIOS.....	104
4.2.9.	ANÁLISIS MODELO DETALLADO, ESTADO III.....	107
4.2.9.1	DEFORMACIÓN.....	109
4.2.9.2	TENSIONES.....	111
4.2.9.3	MODOS PROPIOS.....	113
4.2.10.	ANÁLISIS MODELO DETALLADO, ESTADO IV.....	116
4.2.10.1	DEFORMACIÓN.....	118
4.2.10.2	TENSIONES.....	120



4.2.10.3	MODOS PROPIOS.	122
4.2.11.	ANÁLISIS MODELO DETALLADO, ESTADO V.	125
4.2.11.1	DEFORMACIÓN.	127
4.2.11.2	TENSIONES.	129
4.2.11.3	MODOS PROPIOS.	131
4.2.12.	RESULTADOS MODELO DETALLADO (DFEM).	134
4.2.12.1.	DEFORMACIÓN.	134
4.2.12.2.	TENSIONES.	140
4.2.12.3.	MODALES.	144
5.	CONCLUSIONES.	147
6.	ESTUDIO ECONÓMICO.	149
7.	BIBLIOGRAFÍA.	150
ANEXO I.		151
ANEXO II.		154
ANEXO III.		161
ANEXO IV.		168
ANEXO V.		176
ANEXO VI.		199



LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1: Diagrama tensión-deformación para materiales dúctiles.	3
Figura 2. 2: Interfaz post procesador PATRAN.	8
Figura 3. 1: Plano conjunto de piezas analizadas.	31
Figura 3. 2: Ensayo de rodadura.	32
Figura 3. 3: Vista perfil locomotora.	34
Figura 3. 4: Vista frontal locomotora.	34
Figura 4. 1: Elemento sólido TETRA20.	39
Figura 4. 2: Elemento sólido HEX20.	39
Figura 4. 3: Plot modelo Global FEM.	40
Figura 4. 4: Dimensiones elemento sólido HEXA8, modelo Global (GFEM).	40
Figura 4. 5: FEM componente principal (GFEM).	41
Figura 4. 6: FEM componente secundario (GFEM).	41
Figura 4. 7: Plot perfil Nodos de unión entre los dos modelos FEM (GFEM).	42
Figura 4. 8: Plot frontal Nodos de unión entre los dos modelos FEM (GFEM).	42
Figura 4. 9: Plot sistema de coordenadas “8701”.	43
Figura 4. 10: Plot sistema de coordenadas “0”.	43
Figura 4. 11: Dimensionado FEM componente principal (GFEM).	44
Figura 4. 12: Dimensionado FEM sección A-A’ (GFEM).	44
Figura 4. 13: Dimensionado FEM sección B-B’ (GFEM).	45
Figura 4. 14: Dimensionado FEM sección C-C’ (GFEM).	45
Figura 4. 15: Plot componentes FEM componente secundario (GFEM).	46
Figura 4. 16: Sección FEM componente secundario (GFEM).	46
Figura 4. 17: Dimensionado FEM componente secundario (GFEM).	47
Figura 4. 18: Zona en voladizo del componente principal (GFEM).	48
Figura 4. 19: Cargas externas aplicadas al modelo global (GFEM).	49
Figura 4. 20: Plot propiedades modelo FEM componente principal (GFEM).	49
Figura 4. 21: Distancia aplicación carga externa del componente principal (GFEM). ..	51
Figura 4. 22: Plot distribución carga sobre el componente principal (GFEM).	51
Figura 4. 23: Plot distribución y magnitud carga sobre el componente principal (GFEM).	52
Figura 4. 24: Zonas de restricción de movimiento (GFEM).	55
Figura 4. 25: Condiciones de contorno (GFEM).	56
Figura 4. 26: Detalle condiciones de contorno (GFEM).	57
Figura 4. 27: Deformación máxima modelo global (GFEM).	59
Figura 4. 28: Deformación zona central modelo global (GFEM).	60
Figura 4. 29: Zonas críticas modelo global (GFEM).	62
Figura 4. 30: Representación zona crítica análisis analítico para cálculo de tensiones (GFEM).	62
Figura 4. 31: Cálculo fuerza vertical en el empotramiento (GFEM).	63
Figura 4. 32: Cálculo de momentos en el empotramiento (GFEM).	63
Figura 4. 33: Cálculo de fuerzas normales en el empotramiento (GFEM).	63
Figura 4. 34: Reacciones en la zona crítica (GFEM).	64
Figura 4. 35: Distribución esfuerzos cortantes (GFEM).	65
Figura 4. 36: Diagrama esfuerzos cortantes (GFEM).	65



Figura 4. 37: Distribución esfuerzos flectores (GFEM).....	66
Figura 4. 38: Diagrama esfuerzos flectores (GFEM).	66
Figura 4. 39: Distribución esfuerzos tracción (GFEM).....	69
Figura 4. 40: Zona crítica del modelo global (GFEM).....	70
Figura 4. 41: Remallado zona crítica (DFEM).	71
Figura 4. 42: FEM modelo detallado (DFEM).	72
Figura 4. 43: Dimensiones elemento sólido HEXA8, modelo detallado (DFEM).....	73
Figura 4. 44: Sistema de coordenadas “8701” (DFEM).....	73
Figura 4. 45: Dimensiones zona detallada (DFEM).	74
Figura 4. 46: Dimensiones zona detallada sección D-D’ (DFEM).	75
Figura 4. 47: Dimensiones zona detallada sección E-E’ (DFEM).	75
Figura 4. 48: Nodos SPCD lado GFEM (1).	77
Figura 4. 49: Nodos SPCD lado GFEM (2).	78
Figura 4. 50: Nodos SPCD lado GFEM (3).	78
Figura 4. 51: Nodos SPCD lado DFEM (1).	79
Figura 4. 52: Nodos SPCD lado DFEM (2).	79
Figura 4. 53: Distribución de los nodos SPCD sección D-D’ (1).	80
Figura 4. 54: Distribución de los nodos SPCD sección D-D’ (2).	80
Figura 4. 55: Distribución de los nodos SPCD sección E-E’ (1).	81
Figura 4. 56: Distribución de los nodos SPCD sección E-E’ (2).	81
Figura 4. 57: Vectores deformación SPCD.	83
Figura 4. 58: Vectores deformación SPCD (detalle).	83
Figura 4. 59: Restricciones movimiento modelo detallado sección A-A’ (DFEM).....	84
Figura 4. 60: Restricciones movimiento modelo detallado sección B-B’ (DFEM).	85
Figura 4. 61: Restricciones movimiento modelo detallado (DFEM) (detalle).	85
Figura 4. 62: Distancia zona análisis (DFEM).	88
Figura 4. 63: Dimensiones sección de análisis (DFEM).	89
Figura 4. 64: Deformada zona crítica modelo global (GFEM).	90
Figura 4. 65: Deformada zona crítica modelo detallado (DFEM).....	90
Figura 4. 66: Deformada sección crítica estado I, modelo detallado (DFEM).....	91
Figura 4. 67: Deformada sección crítica estado I, modelo detallado (DFEM).....	92
Figura 4. 68: Mapa de tensiones distribuidas sección crítica estado I (DFEM).....	94
Figura 4. 69: Modo propio 1, estado I (DFEM).	95
Figura 4. 70: Modo propio 2, estado I (DFEM).	96
Figura 4. 71: Modo propio 3, estado I (DFEM).	96
Figura 4. 72: Modo propio 4, estado I (DFEM).	97
Figura 4. 73: Modo propio 5, estado I (DFEM).	97
Figura 4. 74: Modelo detallado estado II (DFEM).	98
Figura 4. 75: Sección de análisis estado II (DFEM).....	99
Figura 4. 76: Dimensiones grieta estado II (DFEM).	99
Figura 4. 77: Deformada grieta estado II, vista isométrica (DFEM).....	100
Figura 4. 78: Deformada grieta estado II, vista perfil (DFEM).....	101
Figura 4. 79: Plot nodos grieta analizar estado II, vista perfil (DFEM).	101
Figura 4. 80: Mapa de tensiones distribuidas sección crítica estado II (DFEM).....	102
Figura 4. 81: Mapa de tensiones zona de la grieta estado II (DFEM).	103
Figura 4. 82: Modo propio 1, estado II (DFEM).	104
Figura 4. 83: Modo propio 2, estado II (DFEM).	105
Figura 4. 84: Modo propio 3, estado II (DFEM).	105
Figura 4. 85: Modo propio 4, estado II (DFEM).	106
Figura 4. 86: Modo propio 5, estado II (DFEM).	106



Figura 4. 87: Modelo detallado estado III (DFEM).....	107
Figura 4. 88: Sección de análisis estado III (DFEM).	108
Figura 4. 89: Dimensiones grieta estado III (DFEM).....	108
Figura 4. 90: Deformada grieta estado III, vista isométrica (DFEM).	109
Figura 4. 91: Deformada grieta estado III, vista perfil (DFEM).	110
Figura 4. 92: Plot nodos grieta analizar estado III, vista perfil (DFEM).....	110
Figura 4. 93: Mapa de tensiones distribuidas sección crítica estado III (DFEM).	111
Figura 4. 94: Mapa de tensiones zona de la grieta estado III (DFEM).....	112
Figura 4. 95: Modo propio 1, estado III (DFEM).....	113
Figura 4. 96: Modo propio 2, estado III (DFEM).....	114
Figura 4. 97: Modo propio 3, estado III (DFEM).....	114
Figura 4. 98: Modo propio 4, estado III (DFEM).....	115
Figura 4. 99: Modo propio 5, estado III (DFEM).....	115
Figura 4. 100: Modelo detallado estado IV (DFEM).	116
Figura 4. 101: Sección de análisis estado IV (DFEM).....	117
Figura 4. 102: Dimensiones grieta estado IV (DFEM).	117
Figura 4. 103: Deformada grieta estado IV, vista isométrica (DFEM).	118
Figura 4. 104: Deformada grieta estado IV, vista perfil (DFEM).	119
Figura 4. 105: Plot nodos grieta analizar estado IV, vista perfil (DFEM).	119
Figura 4. 106: Mapa de tensiones distribuidas sección crítica estado IV (DFEM).....	120
Figura 4. 107: Mapa de tensiones zona de la grieta estado IV (DFEM).	121
Figura 4. 108: Modo propio 1, estado IV (DFEM).	122
Figura 4. 109: Modo propio 2, estado IV (DFEM).	123
Figura 4. 110: Modo propio 3, estado IV (DFEM).	123
Figura 4. 111: Modo propio 4, estado IV (DFEM).	124
Figura 4. 112: Modo propio 5, estado IV (DFEM).	124
Figura 4. 113: Modelo detallado estado V (DFEM).....	125
Figura 4. 114: Sección de análisis estado V (DFEM).	126
Figura 4. 115: Dimensiones grieta estado V (DFEM).....	126
Figura 4. 116: Deformada grieta estado V, vista isométrica (DFEM).	127
Figura 4. 117: Deformada grieta estado V, vista perfil (DFEM).	128
Figura 4. 118: Plot nodos grieta analizar estado V, vista perfil (DFEM).....	128
Figura 4. 119: Mapa de tensiones distribuidas sección crítica estado V (DFEM).	129
Figura 4. 120: Mapa de tensiones zona de la grieta estado V (DFEM).....	130
Figura 4. 121: Modo propio 1, estado V (DFEM).....	131
Figura 4. 122: Modo propio 2, estado V (DFEM).....	132
Figura 4. 123: Modo propio 3, estado V (DFEM).....	132
Figura 4. 124: Modo propio 4, estado V (DFEM).....	133
Figura 4. 125: Modo propio 5, estado V (DFEM).....	133
Figura 4. 126: Desplazamiento componente X de la grieta (DFEM).	135
Figura 4. 127: Desplazamiento componente Y de los nodos (DFEM).....	135
Figura 4. 128: Desplazamiento componente Z de los nodos (DFEM).	136
Figura 4. 129: Comparativa componte X desplazamiento de la grieta (DFEM).....	137
Figura 4. 130: Comparativa componte Y desplazamiento de la grieta (DFEM).....	138
Figura 4. 131: Comparativa componte Z desplazamiento de la grieta (DFEM).	139
Figura 4. 132: Diagrama tensión-profundidad grieta modelo detallado (DFEM).....	140
Figura 4. 133: Diagrama tensión-profundidad con tendencia LINEAL (DFEM).	141
Figura 4. 134: Diagrama tensión-profundidad con tendencia NO LINEAL (DFEM).	142
Figura 4. 135: Modo propio 1, estado I (DFEM).	144
Figura 4. 136: Modo propio 1, estado II (DFEM).	145



Figura 4. 137: Modo propio 1, estado III (DFEM).....	145
Figura 4. 138: Modo propio 1, estado IV (DFEM).	146
Figura 4. 139: Modo propio 1, estado V (DFEM).....	146



LISTAS DE TABLAS

Tabla 2. 1: Criterio de unidades NASTRAN.....	9
Tabla 4. 1: Tarjetas NASTRAN para las SPCD (DFEM).	82
Tabla 4. 2: Tarjeta NASTRAN SPC1 para el modelo detallado (DFEM).	85
Tabla 4. 3: Frecuencias propias para el estado I (DFEM).	95
Tabla 4. 4: Desplazamiento de los nodos, estado II (DFEM).	101
Tabla 4. 5: Frecuencias propias para el estado II (DFEM).	104
Tabla 4. 6: Desplazamiento de los nodos, estado III (DFEM).	110
Tabla 4. 7: Frecuencias propias para el estado III (DFEM).	113
Tabla 4. 8: Desplazamiento de los nodos, estado IV (DFEM).	119
Tabla 4. 9: Frecuencias propias para el estado IV (DFEM).	122
Tabla 4. 10: Desplazamiento de los nodos, estado V (DFEM).	128
Tabla 4. 11: Frecuencias propias para el estado V (DFEM).	131
Tabla 4. 12: Componentes desplazamiento superficie de la grietas (DFEM).	134
Tabla 4. 13: Componentes desplazamiento fondo de la grietas (DFEM).	134
Tabla 4. 14: Comparativa componte X desplazamiento de la grieta (DFEM).	137
Tabla 4. 15: Comparativa componte Y desplazamiento de la grieta (DFEM).	138
Tabla 4. 16: Comparativa componte Z desplazamiento de la grieta (DFEM).	139
Tabla 4. 17: Resultados análisis (DFEM).	140
Tabla 4. 18: Resumen frecuencia (DFEM).	144
Tabla 4. 19: Coordenadas de los nodos SPCD deformados GFEM y DFEM (tabla completa).	169
Tabla 4. 20: Tarjetas NASTRAN para las SPCD (DFEM) tabla completa.	177
Tabla 4. 21: Tarjeta NASTRAN SPC1 para el modelo detallado (DFEM) tabla completa.	200
Tabla 6. 1: Costes análisis.	149



1. OBJETIVOS.

El objetivo de este proyecto, es mostrar como se puede desarrollar un análisis detallado de una estructura, a través de la herramienta de cálculo de elementos finitos **NASTRAN/PATRAN**.

El análisis detallado se va a desarrollar sobre un eje que pertenece al sistema locomotor de un tren, modelo “TALGO”, el cual está montado entre sus ruedas de rodadura y esta cargado con el máximo peso que puede soportar el eje, ver capítulo 3.1.

Vamos a enseñar y demostrar unos procesos de modelado y análisis que se desarrollan con código **NASTRAN**, con los cuales vamos a poder realizar análisis detallados de zonas críticas en piezas de dimensiones con un orden de magnitud muy superior a los defectos a analizar.

Con este trabajo pretendemos demostrar la potencia de cálculo de esta herramienta, la variedad, y la combinación de resultados que podremos obtener para conseguir una mejor eficiencia de nuestros componentes.

2. INTRODUCCIÓN.

La existencia de fisuras en ejes de maquinaria, puede provocar daños catastróficos en el propio eje y también en la maquina en su conjunto, e incluso puede provocar daños en las personas que la manejan. Por ello, el estudio de defectos en componentes resulta de gran ayuda en el campo del mantenimiento de máquinas. A lo largo del presente trabajo se procederá a la realización de un análisis de un eje cilíndrico fisurado sometido a esfuerzos estáticos de flexión.

Se analizarán en profundidad aquellos factores (tensiones, deformaciones) que, durante el desarrollo de los estudios, se compruebe que repercuten en mayor medida en el comportamiento mecánico y de la disminución de la eficiencia de nuestro componente.

El mayor interés de este trabajo será conseguir establecer unas conclusiones fiables de los principales parámetros estudiados, a partir de los resultados obtenidos durante el análisis de los mismos.

La complejidad que han alcanzado este tipo de programas presenta una ventaja, que los modelos cada vez se aproximan más a la realidad. Pero también una desventaja, que su aprendizaje es relativamente complejo, y hoy en día es prácticamente imposible conocer el manejo de este tipo de programas al 100%, pues las posibilidades que ofrecen son muy extensas. Además surgen actualizaciones según se van afianzando conocimientos en áreas desconocidas. Un ejemplo de este caso es la solución 600 de Nastran, que analiza casos de post pandeo.



2.1. CONCEPTOS PRELIMINARES.

La resistencia como tal propiedad es intrínseca del elemento y depende básicamente del material, de los procesos de fabricación empleados en la obtención del mismo y de su geometría. Por ello, el objetivo de los cálculos y estudios de la resistencia de materiales, es establecer los criterios que permitan determinar el tipo de material, la forma y dimensiones adecuadas que hay que dar a los elementos mecánicos para que puedan resistir la acción de las fuerzas exteriores a las que están sometidos.

En el desarrollo de este apartado del proyecto se explican las relaciones entre la resistencia y las fuerzas exteriores con el fin de lograr dimensiones óptimas de los elementos con el requisito de que no falle al estar en servicio.

En primer lugar se diferencia el tipo de fuerza exterior o carga aplicada sobre el elemento en estudio:

- Se define como **carga estática** la aplicada sobre un elemento mecánico cuya magnitud, dirección y punto de aplicación es invariable en el tiempo.

La diferente forma de plantear el estudio de la interrelación de la resistencia de un elemento y la carga que esta aplicada sobre el, va a depender del tipo de carga a la que este sometido, pudiendo diferenciar el estudio por resistencia de un elemento a cargas estáticas (situación que se supondrá en el cálculo de deformaciones: eje inmóvil) o cargas dinámicas (estudio de frecuencias, fatiga y también en el de deformaciones).

2.1.1. RESISTENCIA DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS BAJO CARGAS ESTÁTICAS.

Se debe indicar que para el cálculo de la resistencia en el diseño de máquinas o elementos mecánicos, el estudio óptimo habría que realizarlo con probetas de ensayo del mismo material, en las mismas condiciones que su estado de diseño (acabado superficial, tratamiento térmico, tamaño, etc.), así como someterlo a las mismas solicitudes exteriores que las que sufrirá en servicio (condiciones de carga, condiciones ambientales, etc.). La realización de este estudio resulta muy costosa, lo cual es justificable en situaciones de elevadas producciones de elementos (costes de I+D bajos respecto a coste total) o en casos que se ponga en peligro vidas humanas. En el resto de situaciones se debe ser capaz de calcular su resistencia con los medios con que se dispongan (bibliografía, estudios y tesis anteriores sobre el tema, normas aplicables, resistencia cargas estáticas, técnicos de materiales, etc.) y trabajar con factores de seguridad que permitan estimar posibles sobrecargas o defectos de materiales.

Se define el **factor de seguridad (n)** como:

$$n = \frac{S}{\sigma} = n_i \cdot n_s$$

Donde:

- S= Resistencia máxima del material.
- σ = Tensión máxima a la que esta sometido el material.
- n_i = Efecto de la aplicación de cargas.
- n_s = Efecto de la resistencia del material.

Nota: n_s se atribuye a las características estadísticas del cálculo de la resistencia pudiendo variar entre 1.2- 1.4 con una fiabilidad del 90-99%.

-Características de los materiales dúctiles y frágiles

Resulta importante antes de introducirse en las teorías de rotura de los materiales, resaltar las diferencias existentes entre ductilidad-fragilidad de un material. Para ello se analizara el diagrama ($\sigma - \epsilon$) (Figura 2.1).

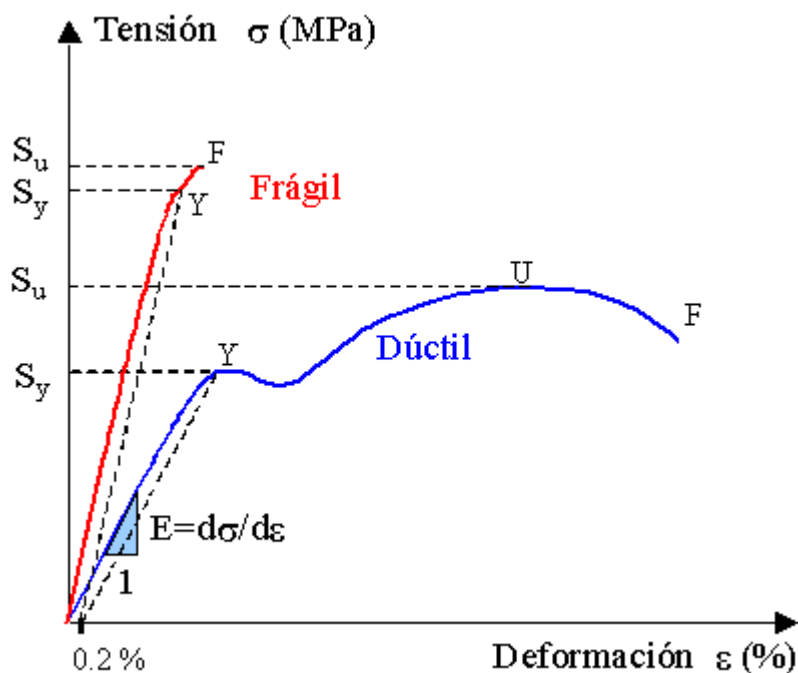


Figura 2. 1: Diagrama tensión-deformación para materiales dúctiles.



Se puede comprobar que en un material dúctil existe una zona de deformación plástica antes de la rotura. Como las deformaciones permanentes no son deseables en ningún elemento mecánico, se considera como límite de tensión máxima aplicable, la resistencia de fluencia (S_Y). En materiales frágiles casi no existe zona de deformación plástica, por lo que el límite de tensión máxima es la resistencia de rotura ó última (S_u).

Si es un material dúctil se realiza la comparación de valores de las tensiones límites a compresión y tracción, se comprueba que los límites de tensiones son de valores muy parecidos para ambos tipos de esfuerzos ($S_{yc} \approx S_{yt}$), mientras que en un material frágil el límite de tensión máxima a compresión es muy superior al límite a tracción ($S_{uc} \gg S_{ut}$), y equivalente el límite de tensión máxima a cortadura con el límite de tensión máxima a tracción ($S_{su} \approx S_{ut}$).

Nota: Los valores de tensiones que han comparado en compresión y tracción se han realizado con el valor absoluto, ya que estos esfuerzos son contrarios.

En el diseño de elementos mecánicos se debe asegurar que las tensiones no superen la resistencia del material. Si se emplea un material dúctil, el criterio que se debe utilizar como valor de resistencia del material es la resistencia de fluencia (S_Y), ya que una deformación permanente sería considerada como rotura.

Sin embargo los materiales frágiles no poseen un punto de resistencia a fluencia, por lo que el criterio de trabajo será la resistencia última (S_u).

Resumen de nomenclatura:

S_f : Resistencia a fatiga
 S_Y : Resistencia a fluencia
 S_u : Resistencia a rotura
 S_{yc} : Resistencia a fluencia en compresión
 S_{yt} : Resistencia a fluencia en tracción
 S_{uc} : Resistencia a rotura en compresión
 S_{ut} : Resistencia a rotura en tracción



2.1.2. NUCLEACIÓN DE DEFECTOS.

Todos los materiales tienen defectos de uno u otro tipo, incluso recién obtenidos por los mejores métodos disponibles: contienen inclusiones, precipitados, poros, bordes de grano... A este grupo de defectos se les denomina internos. A partir de estos defectos se desarrollan micro grietas.

Existe un segundo lugar crítico en cualquier pieza: su superficie. En ella se suelen localizar las tensiones máximas. Estas zonas son candidatas a desarrollar micro defectos superficiales en forma de estriaciones o lengüetas, debidos a la deformación plástica alternada a picaduras producidas por la oxidación superficial, o simplemente, debidos a un pésimo mecanizado.

Ambos tipos de defectos (internos y superficiales), son los responsables de la rotura de la pieza cuando esta está sometida a cargas cíclicas y a lo largo de un periodo de tiempo.

En general, si las cargas son muy severas y superan el límite elástico se producen deformaciones plásticas apreciables en cada ciclo (fatiga de bajo número de ciclos o de gran amplitud), donde normalmente los defectos internos son los causantes de la rotura.

Si las cargas son más reducidas, normalmente los defectos que se originan en la superficie son los causantes de la rotura, ya que poseen una mayor velocidad de crecimiento que los internos en esta situación.

El estado en el que la propagación de las grietas es más lento y costoso para que las mismas avancen, corresponde a un estado de tamaño mínimo de estas, en el caso de un eje en carga: las fuerzas directrices repartidas sobre la sección del eje son pequeñas, y la grieta crece muy lentamente, tanto que durante una buena fracción de la vida de la pieza, las micro grietas resultan invisibles para las técnicas de inspección más habituales. Se denomina a éste como un periodo de incubación o nucleación de las grietas. Por el contrario, cuando la grieta es de mayor tamaño, es cuando ésta desarrolla una velocidad de deformación más elevada, ya que la concentración de tensiones sobre la sección fisurada del eje se eleva por una reducción considerable de la misma.

Una pieza que se diseña para soportar un elevado número de ciclos, normalmente se rompe por un defecto generado en su superficie, ya que este tipo de defectos son los más habituales en un proceso de fatiga corriente. De aquí la gran importancia de proporcionar un acabado superficial óptimo.



2.1.3. MÉTODOS DE LOS ELEMENTOS FINITOS (FEM).

- **Definición del método.**

El método de los elementos finitos, es un método de aproximación de problemas continuos, de tal forma que:

- ✓ El continuo se divide en un número finito de partes, “**elementos**”, cuyo comportamiento se especifica mediante un número finito de parámetros asociados a ciertos puntos característicos denominados “**nodos**”. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.
- ✓ La solución del sistema completo sigue las reglas de los problemas discretos. El sistema completo se forma por ensamblaje de los elementos.
- ✓ Las incógnitas del problema dejan de ser funciones matemáticas y pasan a ser el valor de estas funciones en los nodos.
- ✓ El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las adecuadas **funciones de interpolación ó funciones de forma.**

El FEM por tanto, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua, en un modelo discreto aproximado. Esta transformación se denomina discretización del modelo. El conocimiento de lo que sucede en el interior de este modelo del cuerpo aproximado, obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

Cuando el número de nodos que definen la forma geométrica del elemento es inferior al número de los utilizados en la interpolación de los desplazamientos, se dice que el elemento es subparamétrico. Cuando es superior se dice que es superparamétrico.

En la mayoría de los casos se emplean las mismas funciones de interpolación para la geometría y para los corrimientos. En este caso utilizaremos los elementos isoparamétricos. La transformación isoparamétrica mantiene la continuidad de los corrimientos entre elementos

Como conclusión cabe decir que las funciones de forma, tienen tres cometidos principales dentro del FEM:

- ✓ Obtener resultados en cualquier punto del elemento por interpolación de los valores nodales.
- ✓ Permitir transformaciones geométricas que permiten adaptar el mallado a la forma del cuerpo analizado de una manera exacta.
- ✓ Realizar la integración de las ecuaciones mediante la sustitución de las funciones elementales por *polinomios de legendre*.



- **Pasos a seguir en el cálculo FEM. Funcionamiento de un programa de elementos finitos, NASTRAN/PATRAN.**

Los programas para cálculo por elementos finitos disponen de tres módulos de trabajo. En nuestro caso el pre-procesador también es post-procesador:

- Pre-procesador: Donde se prepara el modelo para cálculo. En él se realizan las operaciones de dibujo del modelo, o importación si se ha generado por medio de un sistema CAD que genere ficheros compatibles, En nuestro caso el pre-procesador es el “**PATRAN**”.
- ✓ Selección del tipo de elemento o elementos a emplear. En función del tipo de cálculos a realizar estos programas suelen disponer de diferentes tipos de elementos que son especiales para cada aplicación. Por ejemplo, suelen tener elementos para cálculos de tensiones planas (Cquad, Ctria, etc.), tensiones 3D (Chexa, Cpenta, etc.) y vienen en función de los nodos que conecten en el espacio.
- ✓ Selección de los materiales a emplear, que pueden obtenerse por librerías, o ser definidos por el usuario. Esto último es común cuando se emplean materiales de propiedades no lineales o materiales anisotrópicos.
- ✓ Asignación de elementos, propiedades de materiales, espesores a los diferentes componentes del modelo.
- ✓ Mallado de los componentes del modelo.
- ✓ Aplicación de las condiciones de contorno del modelo.
- ✓ PATRAN puede interactuar con diversos códigos de análisis (Abaqus, Ansys, Nastran, etc.....).
- ✓ PATRAN-NASTRAN **no entiende de unidades**, Hay que ser rigurosamente coherente al introducir datos e interpretar resultados.

- Post-procesador: Es la herramienta que permite la representación gráfica de los resultados, así como resultados indirectos que se pueden obtener operando las soluciones del modelo.

A continuación mostraremos la interfaz de PATRAN:

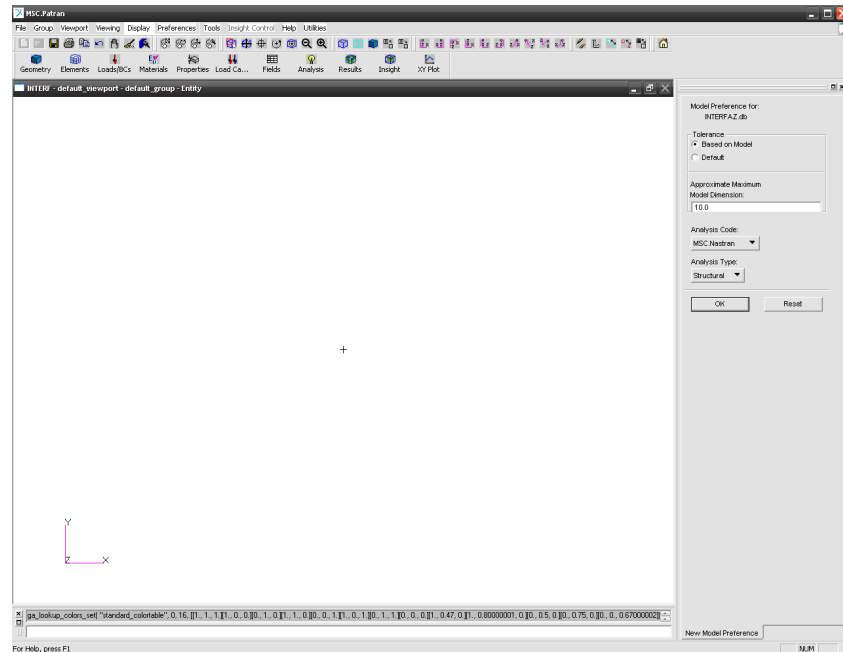


Figura 2. 2: Interfaz post procesador PATRAN.

- Procesador: Es la parte del programa que realiza todo el cálculo del FEM y genera las soluciones. En nuestro caso el programa a utilizar es “**NASTRAN**”. A continuación dentro del apartado introducción vamos a profundizar más en el solver:
 - ✓ Selección del tipo de cálculo a realizar, por ejemplo, si es un análisis transitorio, en régimen armónico, estático, etc.
 - ✓ Configuración de los parámetros de cálculo. Selección de intervalos de tiempo, norma del error, número de iteraciones, etc.
 - ✓ Inicio del cálculo: El programa empieza transfiriendo las cargas al modelo, genera las matrices de rigidez, realiza la triangulación de la matriz, resuelve el sistema de ecuaciones y genera la solución.



2.2. INTRODUCCIÓN AL CÓDIGO NASTRAN (SOLVER).

A continuación explicaremos el código con el que se rige el solver NASTRAN. Se hace esta introducción para mostrar como trabajan estos programas y se explicará el código utilizado para nuestro análisis. No se hace lo mismo con PATRAN porque no queremos que este documento sea un manual de diseño. Se explica NASTRAN porque así se comprenderá como se ha elaborado, y las propiedades que podemos simular de nuestro modelo, así como conocer la herramienta y las posibilidades que nos puede ofrecer.

2.2.1. NASTRAN: Conceptos fundamentales.

Nastran no tiene interfaz alguna, todo lo que necesitamos es un fichero de texto que el programa ejecutará, con la información necesaria del modelo. A su vez, una vez completada la ejecución del programa, éste generará una serie de archivos con los resultados del análisis. Por lo tanto, hay que distinguir principalmente entre ficheros de entrada, o input data y de ficheros de salida, output data. Es importante conocer la estructura de todos ellos, pues la corrección de errores o la búsqueda e interpretación de resultados se suelen realizar a partir de los mismos.

➤ Unidades.

Antes de entrar en profundidad con la estructura de un fichero Nastran, merece la pena detenerse a aclarar las unidades que hay que utilizar. Al igual que Patran, Nastran NO UTILIZA UNIDADES.

De lo único que debemos asegurarnos es que las unidades en que trabajemos sean coherentes entre sí. Por ejemplo, si trabajamos con longitudes en mm y fuerzas en N, debemos ser conscientes de que la presión que aplicaremos será en MPa (N/mm^2).

En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de unidades coherentes, que además son las más comunes en Nastran y Patran:

Tabla 2. 1: Criterio de unidades NASTRAN.

Magnitud	Unidades
Longitud	mm
Fuerza	Newton
Presión	MPa
Masa	T
Densidad	T/mm^3
Aceleración	mm/s^2

Este sistema es coherente, y es el que recomendamos, aunque se puede trabajar con cualquier otro. También debemos tener presente que los resultados serán coherentes a las unidades de entrada.



➤ Estructura del fichero de entrada de Nastran.

El archivo que leerá y ejecutará Nastran para mostrar los resultados, es un archivo de texto y generalmente tiene extensión “.bdf”, si bien Nastran lee otras extensiones. Este archivo contiene absolutamente toda la información del modelo, desde la definición de la geometría hasta la introducción de los casos de carga aplicados, las propiedades de los elementos.... Generalmente será generado en Patran, pues en cuanto a la complejidad del modelo empieza a ser patente, el número de líneas del “.bdf” puede llegar a ser muy alto. Aunque al tratarse de un fichero de texto, lo podremos abrir en cualquier momento y editarlo.

Sin embargo, este archivo es la parte más importante y conviene conocerlo muy bien, pues es normal cometer errores en la generación del “.bdf” con Patran, o tal vez en algún momento nos sea necesario cambiar un dato del modelo (una coordenada, un elemento, una carga, etc.). En estos casos, la mejor solución es acudir al fichero de entrada Nastran, pues resultará mucho más cómodo de modificar, al fin y al cabo es un fichero de texto, por lo que simplemente se trata de cambiar un número, mientras que en Patran borrar o editar puede ser algo más costoso.

El formato más usado para la generación del “.bdf” es el Small Field Format, que consta de líneas de 80 caracteres, divididas en campos de 8 caracteres. En cada campo se introduce una sola característica del objeto que estemos definiendo (número de identificación, coordenada, carga, etc.), por lo que tenemos hasta 8 caracteres para definir ésta característica.

No es necesario rellenar todos los caracteres, lo más importante es que cada valor esté dentro de su campo correspondiente, por lo que normalmente se usarán tabulaciones o se dejarán espacios en blanco.



Es muy importante tener en cuenta estas consideraciones, pues no debemos olvidar que estamos tratando con un programa con un código fuente, en este caso PCL, y este tipo de código son muy poco flexibles a la hora de introducir datos, por lo que un pequeño error hará que el programa no se ejecute.

Un ejemplo muy claro y muy común, es el siguiente:

0

0.

Aparentemente, no hay diferencia entre ambos números. Pero en realidad, algo tan sencillo como esto causará errores fatales en la ejecución del modelo. La diferencia está en que para el programa el “0” sin punto es un número entero, y generalmente se utiliza para asignar una propiedad de una lista, o un número de identificación, no como valor con el que Nastran operará. Mientras que el “0.” Es un número real, usado para dar coordenadas, valores de carga, etc. Con el punto le estamos indicando al programa que este valor es un número decimal. Por lo tanto aunque para nosotros se parezca, para el programa es algo completamente diferente y si Nastran está operando un valor real y nosotros le damos un entero, o viceversa, lo mejor que puede pasar es que no corra (a veces es mejor que no corra y podamos corregir el error, pues si tiene un error menor y se ejecuta, los resultados, lógicamente serán erróneos, pero tal vez no nos demos cuenta). Por lo tanto, en parte de definición de las tarjetas, indicaremos para todos los casos en los que sea necesario si hay que introducir un número real (con “punto” decimal) o entero (sin “punto” decimal).



Existen otros dos formatos para el “.bdf”, uno con campos de 16 caracteres para el caso de que necesitemos más precisión y otro denominado “formato libre”, en el que no son necesarias las tabulaciones.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones, ya podemos entrar más en materia y ver por fin la estructura del fichero de entrada de datos en Nastran:

- Nastran Statement (opcional): en esta parte se puede indicar al program que reserve más bloques de memoria RAM, en este caso de que el modelo sea completo, queramos hacer un mallado muy fino....Esta opción era más útil cuando los ordenadores no eran tan potentes como en la actualidad, ahora ya prácticamente esta opción no se usa.
- File Management Statement (opcional): se indican qué ficheros tiene que leer nastran, en caso de que nuestro modelo vaya unido a otro. En esta parte también se gestionara los ficheros tanto de entrada como de salida, pudiendo cambiar su nombre o ubicación.
- Executive control Statement (obligatorio): En este bloque se especifica el tipo de solución que vamos a solicitar para el análisis (solución elástica, plástica, pandeo...
- CEND: es un comando que hay que poner siempre al final de este bloque, es imprescindible ya que sino el programa no se ejecutará.
- Case control Commands (obligatorio): se incluye la lista de resultados a pedir (desplazamientos, tensiones, reacciones...). También se incluirán las combinaciones de carga que queramos analizar, así como las condiciones de contorno (aunque las cargas estarán definidas en el bloque Bulk data).
- BEGIN BULK: su función es similar a la de la sentencia “CEND”, indicar que en este caso comienza el bulk data, es la parte más importante.
- Bulk Data (obligatorio): Aquí es donde realmente la mayor parte de información del modelo, la geometría, los elementos así como sus propiedades, las cargas, las condiciones de contorno, etc., todos estos datos se introducen mediante “tarjetas”, que son la parte del código destinado a cada objeto y en las que aparece toda la información referente a éste que Nastran necesita: desde la ID o número identificador, hasta el sistema de ejes que utiliza, coordenadas y demás.

Con estos bloques, tendríamos ya definido completamente nuestro modelo. Una vez ejecutado, Nastran devuelve una serie de ficheros.



➤ Archivos de entrada y salida de Nastran.

Como archivos de entrada (los generados por el usuario mediante el procesador o a mano) se pueden encontrar:

- *.bdf: con la estructura anteriormente explicada, es el archivo que ejecuta Nastran. También puede tener extensión *.dat.

Nastran genera una serie de archivos (archivos salida) cada vez que lo ejecutamos, con información acerca del análisis. Algunos los podemos controlar, en función de cómo queramos obtener la información, pero otros aparecen por defecto:

- *.f04: proporciona información sobre las matrices.
- *.log: proporciona información del sistema y de los mensajes de error.
- *.f06 (ASCII): importante, recopila todos los resultados solicitados en el *.bdf.
- *.pch (ASCII): ofrece la misma información que el *.f06, pero más simplificada.
- *.xdb y *.op2 (binarios): solo se puede leer con el programa que han sido generados (en este caso Patran) ya que se presentan en código binario, aunque proporciona la misma información de salida que el *.f06 o el *.pch, aunque ocupado menos memoria. La diferencia entre ellos es que el *.op2 duplica la información (cada vez que Patran lo llama, lo duplica para leerlo). La desventaja del *.xdb es que siempre tienes que tener el archivo para leerlo, mientras que con el *.op2 no, pues una vez leído por Patran, lo duplica y esta información se añade al archivo.

A continuación se va a mostrar un cabecero utilizado en nuestro proyecto en el cual se visualizará todas las partes en las que está dividido y que se han explicado en este capítulo.



Executive controls statement	{	\$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
		\$ translator (MSC.Patran 13.0.053) on February 25, 2002 at 20:36:35.
		\$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
		\$ Direct Text Input for File Management Section
		SOL 101
		\$ Direct Text Input for Executive Control
		CEND
		SEALL = ALL
		SUPER = ALL
		TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
Case control commands	{	ECHO = NONE
		\$ Direct Text Input for Global Case Control Data
		\$
		DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
		STRESS(SORT1,PLOT,BILIN)=ALL
		\$
		SUBCASE 1
		SUBTITLE=ESTATICO_caso1
		LOAD = 300
		SPC = 200
Bulk Data	{	\$
		BEGIN BULK
		PARAM,POST,-1
		PARAM,PRTMAXIM,YES
		PARAM,AUTOSPC,NO
		PARAM,K6ROT,10.0
		PARAM,SNORM,20.
		PARAM,GRDPNT,0
		\$
		\$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321		
\$_____8\$_____8\$_____8\$_____8\$_____8		
\$		
include 'fem/modelo_local_eje.bdf'		
include 'fem/materiales.bdf'		
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'		
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'		
\$		
\$ Referenced Coordinate Frames		
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.		
1. 0. 0.		
ENDDATA 9d9273ec		



2.2.2. NASTRAN: BULK DATA.

Como ya dijimos antes, lo normal no es crear el modelo desde cero con nastran, pero conviene saber como se genera cada parte del modelo, ya que siempre cabe la posibilidad de que tengamos que modificar algún dato o buscar un error. En este apartado vamos a especificar todo lo referente al bulk data, que es donde se genera el modelo propiamente dicho. Es el apartado más importante en cuanto a extensión y en él constan todos los datos “físicos” del problema.

En apartados previos se ha nombrado la existencia de “tarjetas” para la definición de cada línea de código, en las que se introducen las características del elemento en cuestión (entendiendo en este caso “elemento” como cualquier entidad que pertenezca al modelo). Dependiendo de lo que estemos definiendo, las tarjetas pueden cambiar mucho, cada una tiene un formato y un orden. Ahora se comprenderá mejor todo lo dicho acerca del formato del archivo de entrada y de los campos de 8 caracteres:

➤ Generación de geometría: NODOS.

Estamos ante el componente más básico de NASTRAN. Las tarjetas de definición de nodos tiene la siguiente forma:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
GRID	ID	CP	X1	X2	X3	CD	PS	SEID	

Donde:

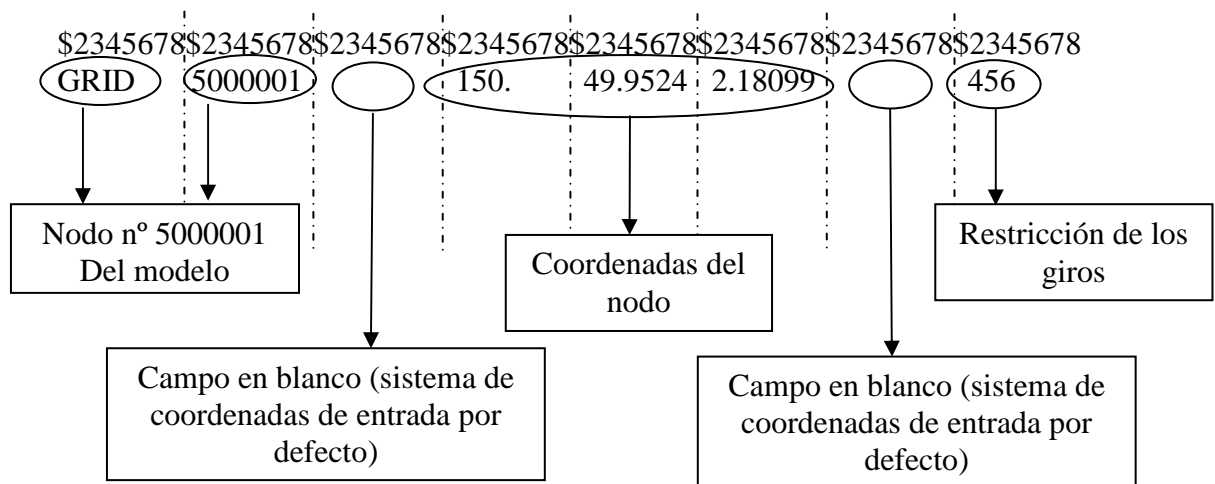
- ✓ GRID: El primer campo es común para todas las tarjetas. En él hay que escribir el tipo de objeto que vamos a definir. Grid es la manera que Nastran llama a los nodos. Por lo tanto, en este campo hay que escribir la palabra “GRID” para que el programa sepa que estamos definiendo un nodo.
- ✓ ID: Este segundo campo también es común. Aquí se escribe el número de identificación del nodo, en este caso. Los números de identificación no se pueden repetir. ($0 < \text{Entero} < 100000000$)
- ✓ CP: Sistema de coordenadas en la que se define la posición del nodo. Generalmente se usa el que hay por defecto (dejándolo en blanco o indicando un 0), pero puede que necesitemos otro sistema diferente para un nodo o grupo de nodos, o tal vez nos interese definirlos en coordenadas polares o esféricas. Se indica escribiendo el ID del sistema de coordenadas. ($\text{Entero} \geq 0$)
- ✓ X1, X2, X3: Coordenadas del nodo en el sistema indicado en el campo anterior. (Real)
- ✓ CD: Sistema de coordenadas en el que queremos que estén expresados los resultados (tales como desplazamientos o esfuerzos aplicados en el nodo correspondiente). ($\text{Entero} \geq 0$)



PS: Condición de contorno permanente asociada al nodo (cuidado, no es igual que una condición de contorno del problema, generalmente estas no se usan). Tenemos que escribir los grados de libertad que queremos coaccionar: 1, 2 y 3 para los movimientos en X, Z e Y y 4, 5 y 6 para los giros (en los ejes de definición del nodo). Se escriben sin comas y separados por un espacio. (Entero del 1 al 6)

SEID: “Super Element identificación Number” este campo solo se usará cuando se trabaje con superelementos, algo fuera del alcance de este manual. (Entero ≥ 0 ; por defecto = 0).

Con estos datos podríamos definir todos los nodos que quisiéramos. Vamos a ver un ejemplo para que quede claro del todo el modo en el que se tiene que escribir:



Tenemos el nodo 5000001 de un modelo. Al dejar el campo del sistema de coordenadas de entrada en blanco, estamos seleccionando el sistema de coordenadas de entrada en blanco, estamos seleccionando el sistema que viene por defecto, el global. Las coordenadas son (150.0, 49.95, 2.18). El sistema de salida es el sistema por defecto también en este caso. Se han restringido los giros. Es interesante apreciar como cada dato va en su campo, sin salirse de los 8 caracteres que le corresponden. Si en un campo no vamos a escribir nada, no se trasladan los demás, simplemente se deja en blanco.

Es importante destacar el hecho de que no es necesario definir todos los campos de todas las tarjetas; si no nos interesa dar una propiedad determinada o un dato específico, se puede dejar en blanco el campo y el programa no dará error (a menos que sea un dato básico). Esto es válido para todas las tarjetas, por lo que aquí en adelante no lo repitiéremos.



➤ Definición de elementos y sus propiedades.

Los elementos son los componentes estructurales que conectan los nodos. Los principales tipos de elemento son:

- ✓ Elementos viga (1D)
- ✓ Elementos placa (2D)
- ✓ Elementos sólidos (3D)

Además, existen otro tipo de elementos que no se pueden incluir en esta clasificación, pero que son muy importantes:

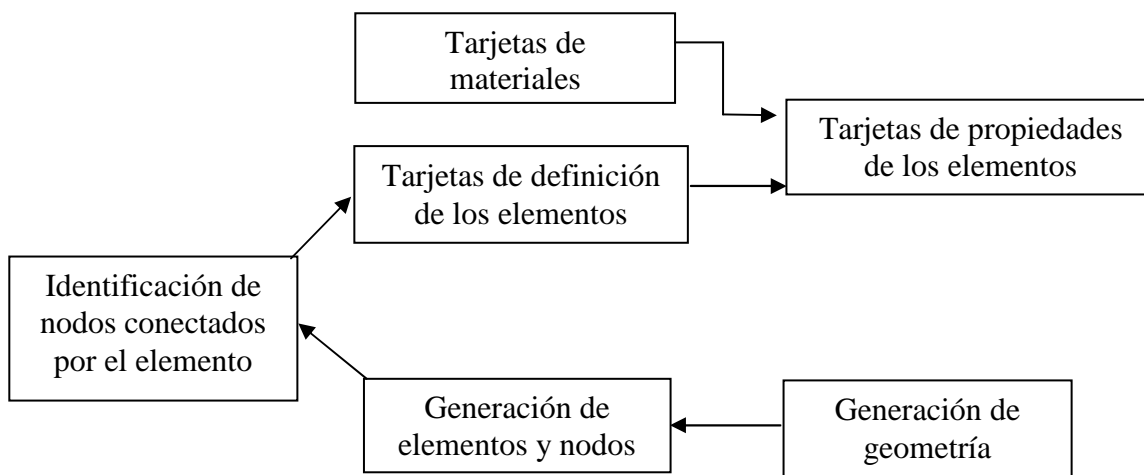
- ✓ Elementos muelle
- ✓ Elementos rígidos

Es importante reseñar la diferencia que hay entre la definición de un elemento y la asignación de las propiedades a ese mismo elemento.

- ✓ En la tarjeta de definición del elemento se proporcionan datos como el tipo de elemento que es, su número de identificación o los nodos que conecta
- ✓ En la tarjeta de propiedades del elemento se indica el material, área de sección, módulos resistentes, etc.

Si bien en el bulk data primero se especifican las tarjetas de definición de todos los elementos y luego las de propiedad, aquí se explicarán ambas juntas para cada tipo de elemento, a fin de facilitar su comprensión.

A continuación se muestra un esquema básico sobre el orden de generación de las tarjetas (no el orden que ocupan en el bulk data, sino según los datos que necesitamos). De esta manera se pretende tener una visión global de la secuencia que hay que seguir para la generación de las tarjetas que tienen relación con los elementos.



A continuación se procederá a la definición de las tarjetas de los elementos utilizados para la elaboración de nuestros modelos, no se explican todos los elementos porque si no este documento sería demasiado extenso y tampoco es el cometido de este proyecto, no se explicarán todos los parámetros porque no son necesarios para esta introducción y además son muy poco utilizados.

El elemento utilizado como estructura principal, **CHEXA**, donde la tarjeta de entrada del elemento al programa de pre-procesador PATRAN y al programa post-procesador NASTRAN:

TARJETA:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CHEXA	EID	PID	G1	G2	G3	G4	G5	G6	
	G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	
	G15	G16	G17	G18	G19	G20			

Donde:

- ✓ EID: Es el numero identificador del elemento, tiene que ser un numero entero y como máximo su campo tiene que ser de 8 caracteres.
- ✓ PID: Es el numero identificador de la propiedad PSOLID, tiene que ser un numero entero y como máximo su campo tiene que ser de 8 caracteres.
- ✓ Gi: Es el numero identificador de los nodos de conexión del elemento, tiene que ser un numero entero y como máximo su campo tiene que ser de 8 caracteres.

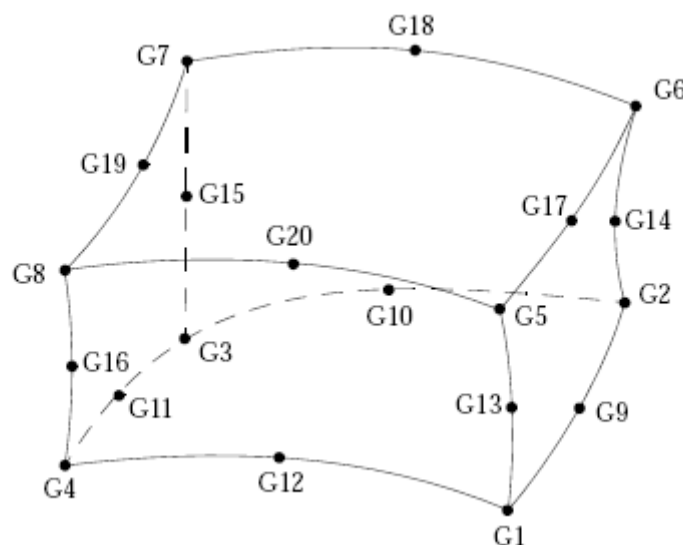


Figura 2.3: Elemento sólido CHEX20.



PROPIEDAD PSOLID:

Define las propiedades que va a tener los elementos CHEXA, CPENTA, CTRETA,....

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PSOLID	PID	MID	CORDM	IN	STRESS	ISOP	FCTN		

Donde:

- ✓ PID: Es el numero identificador de la propiedad PSOLID, tiene que ser un numero entero y como máximo su campo tiene que ser de 8 caracteres.
- ✓ MID: Es el numero identificador de la tarjeta MAT1, es la tarjeta que marca el material del elemento, tiene que ser un numero entero y como máximo su campo tiene que ser de 8 caracteres.
- ✓ CORDM: Es numero identificador del sistema de coordenadas del material al que se la va aplicar el elemento, tiene que ser un numero entero y si su casilla esta vacía automáticamente nastran toma como eje material el sistema de coordenadas básico.

NOTA:

El sistema de coordenadas material hay que tenerlo en cuenta por que marcara las direcciones de las propiedades del material: como el módulo elástico.

El material a utilizar es acero (Isotrópico) por lo que se comporta igual en cualquier dirección, lo mencionado anteriormente sería importante en materiales ortotrópicos como por ejemplo: material compuesto.



DEFINICIÓN DE MATERIALES:

Hay diferentes tarjetas que se pueden usar para definir un material, aunque principalmente se usan dos: la tarjeta “MAT1” para materiales isotrópicos lineales, la tarjeta “MAT2” para materiales anisótropos, la tarjeta “MAT8” para materiales ortotrópicos. Para nuestro proyecto como vamos a utilizar acero la tarjeta a utilizar es la MAT1 que se define a continuación:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MAT1	MID	E	G	NU	RHO	A	TREF	GE	
	ST	SC	SS	MCSID					

Donde:

- ✓ MID: Número de identificación del material.
- ✓ E: Módulo de young.
- ✓ G: Módulo de cortadura.
- ✓ NU: Coeficiente de poisson.
- ✓ RHO: Densidad del material (recordamos que para unidades de N y mm, la densidad se dará en T/mm^3).
- ✓ A: Coeficiente de expansión térmica.
- ✓ TREF: Temperatura de referencia (solo será necesaria si vamos a tener en cuenta cargas térmicas).
- ✓ GE: Coeficiente de amortiguamiento del elemento.
- ✓ ST, SC, SS: Límites de esfuerzo del material a tracción, compresión y cortadura. Son utilizados para el cálculo de márgenes de seguridad, a partir de los resultados de esfuerzos. No se suelen usar.
- ✓ MCSID: ID del sistema de coordenadas material, muy poco usado.

NOTA:

Hay que decir que, salvo para usos muy concretos, generalmente bastará con dar de los tres datos siguientes; E, G, UN, RHO (si se van a calcular frecuencias propias y si es importante la carga que ejerce la gravedad).



➤ Condiciones de contorno: restricciones.

Definimos como condiciones de contorno, a las restricciones de movimiento (Grados De Libertad) que aplicamos al modelo, estas restricciones se aplican sobre los nodos que forman el modelo y se definen en las tarjetas SPC1 (Single Point Constraint), que tiene la siguiente forma:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SPC1	SID	C	G1	G2	G3	G4	G5	G6	
	G7	G8	G9	-etc.-					

Donde:

- ✓ SID: Número de identificación de la SPC1.
- ✓ C: Grados de libertad que se restringen (1, 2, 3 para desplazamientos y 4, 5, 6 para los giros) en el sistema de coordenadas de salida de cada nodo.
- ✓ Gi: ID's de los nodos que son restringido.

Es útil intentar que todos los nodos que tengan las mismas restricciones tengan el mismo sistema de salida, pues resulta más cómodo crear las SPC. Además, así nos aseguramos de que todas las restricciones están bien introducidas, así a la hora de evaluar las reacciones en nuestro modelo en las zonas de restricción de movimiento todas las fuerzas estarán referenciadas al mismo sistema de salida que el resto de los nodos del modelo, es más fácil chequear y evaluar los resultados del modelo.

Las tarjetas SPC pueden repetir ID, por lo que podemos generar varias tarjetas SPC con restricciones que se complementen (por ejemplo, podemos separar desplazamientos en una y giros en otra para tenerlo más controlado). Eso sí, si alguna de las restricciones se repite (aunque no se contradiga) NASTRAN detectará un error.

Existe otra tarjeta, que también utilizaremos para nuestro proyecto, con la que podemos combinar varias SPC1 ya que generalmente no bastará con una sola para definir el sistema de apoyos del modelo.

Tarjeta SPCADD:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SPCADD	SID	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	
	S8	S9	-etc.-						

Donde:

- ✓ SID: Número de identificación de la SPCADD.
- ✓ Si: Número de identificación de las tarjetas SPC que queramos incluir.



De esta manera, podemos tener definidas varias condiciones de contorno en un mismo modelo y generar varios caso de carga con apoyos distintos.

NOTA:

A la hora de hablar de restricciones, hay que tener en cuenta las SINGULARIDADES. Una singularidad se produce cuando NASTRAN detecta que uno de los nodos del modelo tiene un desplazamiento infinito, es decir, tenemos un mecanismo. Esto es intolerable, y aunque matemáticamente el programa lo resuelve, generalmente dará un error. Hay veces en las que la singularidad no es tan obvia y el programa corre, aunque dará un aviso de que hay errores en potencia, errores que aparecen en términos de grados de libertad.

Para saber donde a fallado el modelo, tenemos que buscar en el archivo generado NASTRAN de extensión *.f06 la palabra “FATAL”, pues cuando hay un FATAL ERROR es ahí donde deja de correr. En esa parte muestra los nodos que dan error y los grados de libertad que no puede restringir el programa (en el sistema de salida de los nodos). El fallo no siempre está en los grados de libertad del nodo, puede ser que las propiedades del elemento no admitan la carga que le llega, puede ser que alguno de los elementos adyacentes no aporten rigidez, que no tenga las propiedad asignada, que la SPC no esta activada, que haya nodos sueltos, que tengamos bordes libres, etc.... Todos esto son fallos comunes los cuales hace tan complejo trabajar con modelos de elementos finitos cuanto más quieras reproducir la realidad posiblemente mas fallos y complicaciones nos encontraremos.



➤ Introducción de cargas.

En este apartado vamos a explicar las tarjetas de entrada de carga que vamos a utilizar para elaborar nuestro estudio, NASTRAN tiene numerosas formas de introducir cargas en los modelos pero como hemos explicado en apartados anteriores tampoco no queremos extender demasiado en estas explicaciones, sino solo queremos que sean fuente de conocimiento para poder entender mejor tanto la generación del modelo como de la interpretación de los resultados del modelo.

Fuerzas puntuales: tarjetas FORCE.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FORCE	SID	G	CID	F	N1	N2	N3		

Donde:

- ✓ SID: Número de identificación de la tarjeta FORCE.
- ✓ G: Número de identificación del punto sobre el que se aplica la fuerza.
- ✓ CID: Número de identificación del sistema de coordenadas en el que se aplicará la fuerza.
- ✓ F: Módulo de la fuerza.
- ✓ Ni: Componentes del vector fuerza tal que: $f = F \cdot Ni$
 - f: fuerza real
 - F: Módulo
 - Ni: Vector aplicación

Momentos puntuales: tarjetas MOMENT.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
MOMENT	SID	G	CID	M	N1	N2	N3		

Donde:

- ✓ SID: Número de identificación de la tarjeta MOMENT.
- ✓ G: Número de identificación del punto sobre el que se aplica el momento.
- ✓ CID: Número de identificación del sistema de coordenadas en el que se aplicará el momento.



- ✓ M: Módulo del momento.
- ✓ Ni: Componentes del vector momento tal que: $m = M \cdot Ni$
 - m: Momento real
 - M: Módulo
 - Ni: Vector aplicación

Carga de la gravedad, GRAV.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
GRAV	SID	CID	A	N1	N2	N3	MB		

Donde:

- ✓ SID: Número de identificación de la tarjeta GRAV.
- ✓ CID: Número de identificación del sistema de coordenadas en el que se aplicará la fuerza.
- ✓ A: Valor de la aceleración.
- ✓ Ni: Componentes del vector aceleración en el sistema de coordenadas especificado.

Desplazamientos forzados: tarjetas SPC o SPCD

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SPC	SID	G1	C1	D1	G2	C2	D2		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SPCD	SID	G1	C1	D1	G2	C2	D2		

Donde:

- ✓ SID: Número de identificación de la tarjeta.
- ✓ Gi: Número de identificación del nodo.
- ✓ Ci: Grados de libertad afectado.
- ✓ Di: Valor numérico del desplazamiento forzado.



Las ID de las tarjetas de cargas también se pueden repetir. Así, podemos referirnos a varias cargas con una sola ID. Aunque para controlar mejor esto, existen las tarjetas LOAD, mediante las cuales llamamos a otras tarjetas de carga. Así es más sencillo y menos lioso generar combinaciones de carga.

Tarjetas LOAD.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LOAD	SID	S	S1	L1	S2	L2	S3	L3	
	S4	L4	-etc.-						

Donde:

- ✓ SID: Número de identificación de la tarjeta LOAD.
- ✓ S: Factor de mayoración general; es decir, es un factor que multiplicara a cada tarjeta de carga que contenga esta tarjeta LOAD; $S \cdot (S_1 \cdot L_1); S \cdot (S_2 \cdot L_2)$.
- ✓ Si: Factor de mayoración de cada tarjeta. Este factor solo multiplicará al campo Li que está en la tarjeta LOAD; $(S_1 \cdot L_1); (S_2 \cdot L_2)$, etc.
- ✓ Li: Número de identificación de cada tarjeta de carga.

Esta es la mejor manera de generar casos de carga. Lo más recomendable es usar ID's diferentes para cada carga, y luego combinarlas con tarjetas LOAD, ya que así tenemos las cargas más controladas, de esta manera es más sencillo modificarlas por separado y además de esta manera podemos usarlas por separado si queremos y crear todas las combinaciones que queramos.



➤ Parámetros.

En el Bulk data, además, existen multitud de parámetros que podemos pedir para especificar o completar la información acerca del modelo. Son conocidos como “PARAM”, se escriben siempre a continuación de la línea “BEGIN BULK” (ver capítulo 2.2.1) y afectan a todo el modelo. Los que aparecen con más frecuencia y los que vamos a utilizar en nuestro estudio, además para un estudio lineal solo utilizaremos dos parámetros, que se detallan a continuación:

- POST: Este parámetro regula la salida de los resultados de NASTRAN, existen dos posibilidades; se marca como “0” valor entero NASTRAN vuelca todos los resultados en un archivo “*.xdb” (ver capítulo 2.2.1), la otra posibilidad es, escribir “-1” valor entero NASTRAN vuelca todos los resultados en un archivo “*.op2” (ver capítulo 2.2.1).
- AUTOSPC: Este parámetro coloca automáticamente SPC’s en nodos cuando el modelo es inestable, para que no se transforme en mecanismo. Por defecto este valor aparece siempre activado (PARAM AUTOSPC = YES) pero no es recomendable, al menos hacerlo sin ser consciente de ello. El problema es que si el modelo no está bien restringido, como NASTRAN coloca SPC automáticamente, no sabremos que cometimos un error. Además, coloca SPC’s sin que nosotros podamos controlarlo, de manera que seguramente colocará alguna en algún nodo donde no queremos. Por lo tanto, nos encontramos con el modelo con nodos restringidos que no habíamos previsto, por lo que los resultados no serán correctos. Por este motivo es mejor dejarlo desactivado, y es preferible que el programa no corra para así tener la certeza de que cuando corra es porque está bien. Una manera de llevar un control de AUTOSPC es mostrando las fuerzas en las SPC’s de manera que, si vemos que algún nodo se lleva carga que no debe, es porque NASTRAN nos colocó una restricción. De este modo sabemos que ese punto está suelto y habrá que arreglarlo porque NASTRAN no va a ejecutarse.



2.2.3. NASTRAN: EXECUTIVE CONTROL STATEMENTS.

En este bloque la parte que se solicita es el tipo de solución que se va a ejecutar. Se indica mediante la orden SOL seguida del número que indica el tipo de solución. Las más importantes son:

SOL 101: Solución elástica lineal o no lineal.

SOL 103: Modos normales de vibración.

SOL 105: Análisis de pandeo.

SOL 144: Respuesta aeroelástica estática.

SOL 145: Flujo aerodinámico.

SOL 600: Análisis estático no lineal.

Hay más soluciones, estos son solo algunos ejemplos, los que vamos a utilizar en este proyecto son la 101 y 103. En principio con indicar la solución es suficiente para este bloque.

Es muy importante escribir el comando CEND para indicar que empieza el siguiente bloque.

2.2.4. NASTRAN: CASE CONTROL COMMANDS.

Hasta ahora hemos visto como habría que generar el modelo, pero con esto no podríamos ejecutar NASTRAN y obtener resultados, hay otros bloques que hay que introducir en el archivo de entrada de datos. No debemos olvidar en ningún caso que NASTRAN es un programa y como tal hay que indicar paso a paso la secuencia de comandos que debe leer.

Como se comentó en el capítulo 2.2.1, la petición de resultados se realiza en el case command, en el que debe constar cada subcaso, con los siguientes datos:

- Número del subcaso: Esto se debe hacer con el comando “subcase” seguido de un número entero. A partir de aquí todos los comandos están tabulados (ya que pertenecen a este subcaso) hasta el próximo “SUBCASE”. Los números de los subcasos siempre deben ir de menor a mayor, sino NASTRAN no correrá. En la siguiente línea, escribimos “SUBTITLE” y el nombre que queramos para nuestro subcaso. Esto es útil pues luego en los archivos de resultados Nastran utiliza este nombre para identificar los subcasos.



- Cargas o combinación de cargas aplicadas: Llamamos a las fuerzas que vayamos a aplicar mediante el comando “LOAD = n° entero” que hará referencia a:
 - ✓ Una tarjeta PLOAD que contiene la combinación de cargas.
 - ✓ Todas las tarjetas LOAD que tengan esa ID.
- Sistema de apoyo (tarjetas SPC1 o SPCADD) (ver capítulo 2.2.2), de la misma manera que con las cargas, llamamos a las SPC que necesitemos mediante el comando “SPC = n° entero” que hará referencia a:
 - ✓ Una tarjeta SPCADD que contiene todas las SPC.
 - ✓ Todas las SPC del caso de carga.
- Resultados que se van a solicitar; El número y variedad de los resultados que se pueden solicitar es enorme, y varía también con el tipo de solución que estemos corriendo (por ejemplo, en soluciones de pandeo se pueden solicitar los autovalores de modos propios). Todos los comandos de petición de resultados se encuentran en el “Reference Manual” de la ayuda de NASTRAN, apartado “1.6.1 Case control commands for output”. A continuación se exponen las que se han utilizado en nuestro proyecto, con el formato en que deben ser escritos los parámetros más importantes:

- **DISPLACEMENT**; desplazamientos en los nodos seleccionados

$$\text{DISPLACEMENT} \left[\left(\begin{bmatrix} \text{SORT1} \\ \text{SORT2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \text{PRINT, PUNCH} \\ \text{PLOT} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \text{REAL or IMAG} \\ \text{PHASE} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \text{PSDF, ATOC, CRMS} \\ \text{RALL} \end{bmatrix}, \right. \\ \left. \begin{bmatrix} \text{RPRINT} \\ \text{NORPRINT} \end{bmatrix}, \text{RPUNCH}, [\text{CID}], \left[\frac{\text{TM} = f}{\text{T1} = f, \text{T2} = f, \text{T3} = f} \right], \left[\frac{\text{RM} = f}{\text{R1} = f, \text{R2} = f, \text{R3} = f} \right] \right] = \left\{ \begin{array}{c} \text{ALL} \\ n \\ \text{NONE} \end{array} \right\}$$

SORT1; La salida de resultados se presentará como un listado tabulado de nodos para cada carga, frecuencia, auto valor o tiempo, dependiendo del tipo de solución.

SORT2; La salida de resultados se presentará como una lista tabulada de cargas, frecuencias o tiempo en cada nodo.

PRINT; Genera los desplazamientos en el *.f06 (archivo de texto).

PLOT; Genera los desplazamientos en el *.op2 o *.Sáb. (para mostrarlos en el patran).



REAL or IMAG; Petición de formato rectangular (real e imaginario) de resultados complejos. Usar REAL o IMAG proporciona el mismo resultado.

PHASE; Petición de formato polar (módulo y argumento) de resultados complejos. El argumento se muestra en grados.

CID; Petición de imprimir el sistema de coordenadas de salida ID en el archivo de salida *.f06.

ALL; Se mostrarán desplazamientos para todos los puntos.

n; Identificación de un SET (grupo de elementos o nodos seleccionados a través de PATRAN) previamente definidos. Solamente se mostrarán los resultados de puntos que aparezcan en el SET.

NONE; No se mostrarán los resultados de puntos que aparezcan en el SET.

Hay que mencionar que no es necesario rellenar todos los campos. Basta con escribir solamente lo que necesitemos en cada caso, además hay que decir que las que aparecen marcadas en la figura, NASTRAN las utiliza por defecto, si no se escribe nada estas serán las salidas que tome el programa (ejemplo; displacement = ALL o displacement (Plot, Phase) = ALL, en el caso anterior utilizaría PRINT y en el otro caso además de PRINT utiliza PLOT).

- **STRESS;** Petición de salida de forma y tipo de tensiones en los elementos.

$$\text{STRESS} \left[\left(\begin{bmatrix} \text{SORT1} \\ \text{SORT2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \text{PRINT, PUNCH} \\ \text{PLOT} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \text{REAL or IMAG} \\ \text{PHASE} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \text{VONMISES} \\ \text{MAXS or SHEAR} \end{bmatrix}, \right. \right.$$

$$\left. \begin{bmatrix} \text{CENTER} \\ \text{CUBIC} \\ \text{SGAGE} \\ \text{CORNER or BILIN} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \text{PSDF, ATOC, CRMS} \\ \text{or RALL} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \text{RPRINT} \\ \text{NORPRINT} \end{bmatrix}, \text{RPUNCH} \right) = \left\{ \begin{array}{c} \text{ALL} \\ n \\ \text{NONE} \end{array} \right\}$$

VONMISES; Petición de tensión de Von mises.

MAXS or SHEAR; Petición de máxima cortante en el plano para elementos placa y tensión octaédra en elementos sólidos.



- **SPCFORCES**; Tipo de forma del vector de fuerzas en los puntos de restricciones. Es decir, de esta manera obtenemos las reacciones.

$$\text{SPCFORCES} \left[\left(\begin{bmatrix} \text{SORT1} \\ \text{SORT2} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \text{PRINT}, \text{PUNCH} \\ \text{PLOT} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \text{REAL or NOZPRINT} \\ \text{PHASE} \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} \text{PSDF, ATOC, CRMS} \\ \text{or RALL} \end{bmatrix}, \right. \\ \left. \begin{bmatrix} \text{RPRINT} \\ \text{NORPRINT} \end{bmatrix}, \text{RPUNCH}, [\text{CID}] \right) = \begin{cases} \text{ALL} \\ n \\ \text{NONE} \end{cases}$$

En cada bloque o SUBCASE deberá constar cada uno de los apartados definidos, quedando como se muestra en el siguiente ejemplo:

```
CEND
SUBCASE 1
$ Subcase name : caso 1
  SUBTITLE : caso 1
  SPC = 1
  LOAD = 1
  Displacement(SORT1,REAL) = ALL
  STRESS(SORT1,REAL,VONMISES,BILIN) = ALL
SUBCASE 2
$ Subcase name : caso 2
  SUBTITLE : caso 2
  SPC = 1
  LOAD = 2
  Displacement(SORT1,REAL) = ALL
  STRESS(SORT1,REAL,VONMISES,BILIN) = ALL
```

En este caso hay dos subcasos de carga, caso 1 y caso 2. Es muy importante que los subcasos vaya ordenados siempre de mayor a menor, sino NASTRAN no correrá. Las condiciones de contorno aplicadas son las mismas en ambos casos (con el parámetro SPC llamamos a la SPCADD que contiene la combinación de las SPC1 necesarias), y las cargas son distintas. Las tarjetas LOAD, contienen las combinaciones de carga a aplicar en cada subcaso.

De esta manera el bloque case control commands estaría perfectamente definido y funcionaría sin problemas.

3. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA.

3.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES.

El componente a analizar es un eje que pertenece al sistema locomotor de un tren “serie 250” este sistema esta formado por un ensamblaje de diferentes componentes, como se puede observar en la siguiente figura:

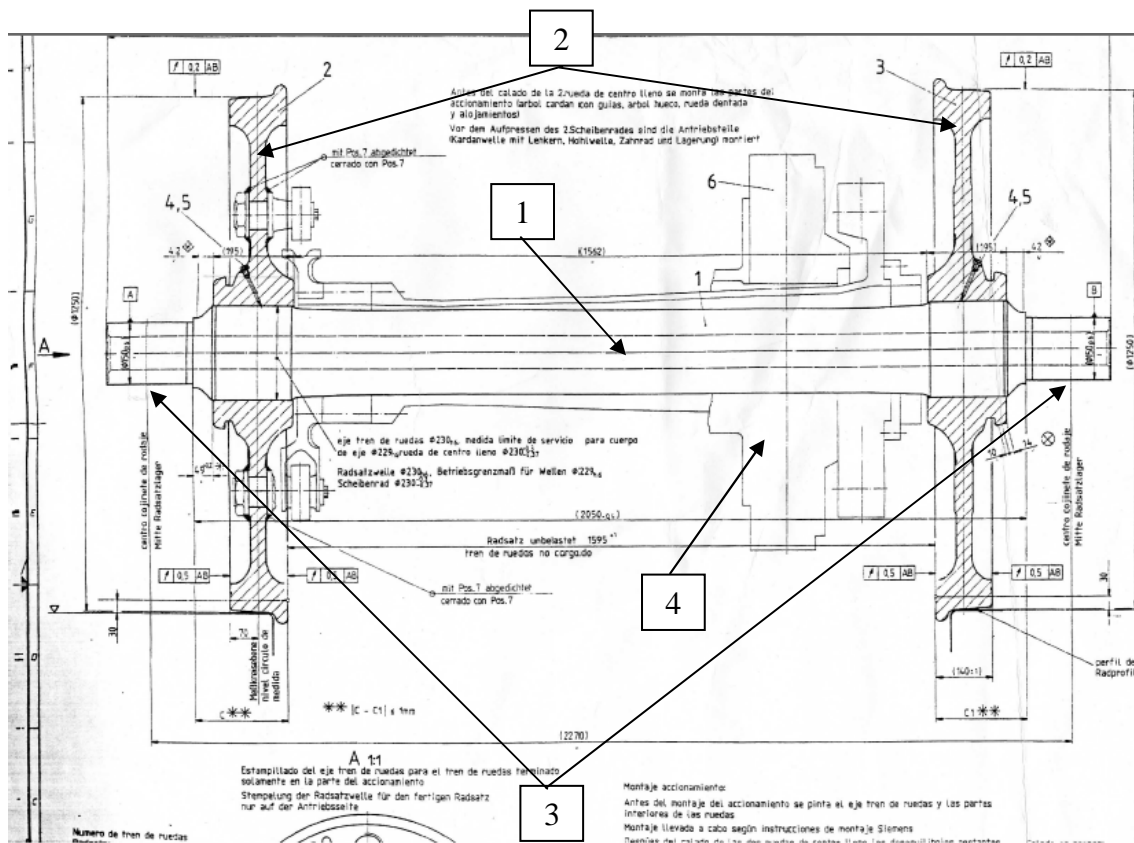


Figura 3. 1: Plano conjunto de piezas analizadas.

En esta figura se puede observar los diferentes partes de este sistema. Todos estos componentes forman parte del sistema a analizar, aunque el único componente a estudio en esta memoria solo va a ser el eje, pero el resto de piezas son muy importantes ya que son los que aportan la entrada de carga y las condiciones de contorno para llevar acabo el estudio que más se acerca a la realidad.

Los componentes se explicaran en los siguientes apartados:

1. El eje; sus dimensiones serán acotadas a continuación. Es la pieza a analizar y una de las importantes ya que es la pieza intermediaria entre el motor (engranajes, poleas, etc.) y las ruedas que generan el movimiento.
2. Ruedas; son las están unidas a la vía a través de rozamientos entre la rueda y la vía pasan de movimiento rotativo a movimiento lineal. Es el componente que marcara las condiciones de contorno del sistema analizar.
3. Cojinete de rodaje; son los componentes que están unidos a la amortiguación y son elementos de entrada de carga.
4. Rueda dentada; es el componente que transmite el movimiento del motor a las ruedas. Es otro componente de entrada de carga.

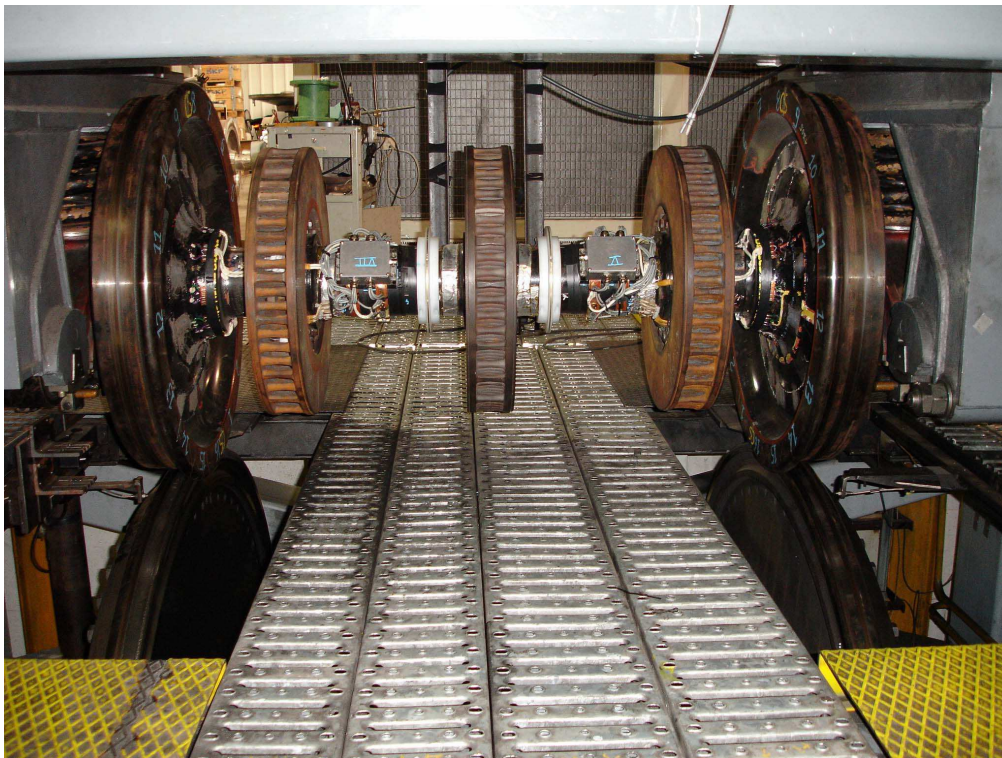


Figura 3. 2: Ensayo de rodadura.



A continuación se mostraran las características del tren en el que irá montado nuestro eje y así poder conocer las cargas a las que va estar expuesto nuestro componente:

CARACTERISTICAS GENERALES:

Velocidad comercial máxima.....	250 Km/h
Aceleración lateral máxima en curva.....	1.2 m/s ²
Ancho de vía.....	1435 mm / 1668 mm
Tracción.....	Eléctrica
Cabezas motrices.....	2
Coches pasajeros (máximo).....	11
Ejes tractores.....	8
Número máximo de ejes del tren.....	20
Peso máximo por eje.....	20 Tn
Longitud máxima del tren.....	183 m
Alimentación eléctrica.....	25 kv, 50 Hz / 3 kv c.c.
Potencia instalada.....	2400 Kw. c.a. /2000 kw c.c.
Grupos de potencia.....	Dos grupos idénticos e independientes
Bogies.....	Bo - Bo
Empate.....	2.8 m
Frontal Aerodinámico.....	Optimizado para ondas de presión y viento lateral
Frenado neumático.....	Dos discos freno por eje
Frenado eléctrico Recuperación.....	(2400 kw) y Reostático (2000 kw)
Longitud.....	20 m
Anchura máxima.....	2.96 m
Altura.....	4 m

A continuación se presentan los planos de perfil y de una sección de la locomotora:

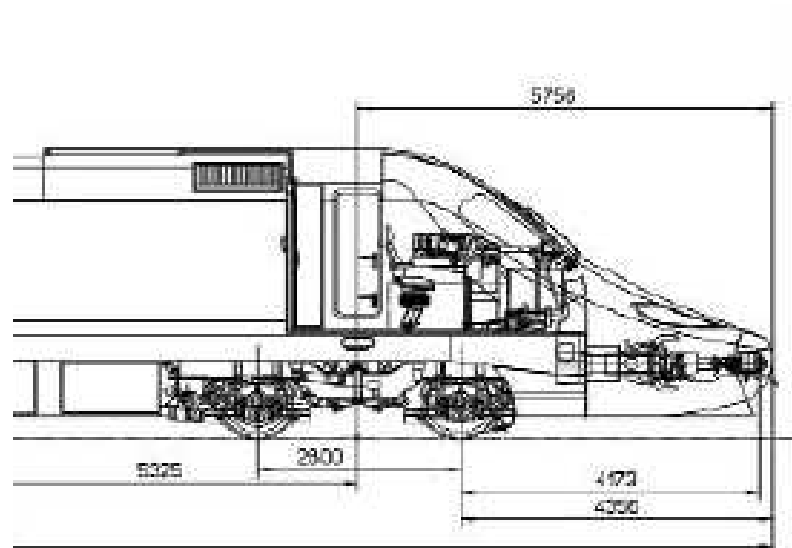


Figura 3. 3: Vista perfil locomotora.

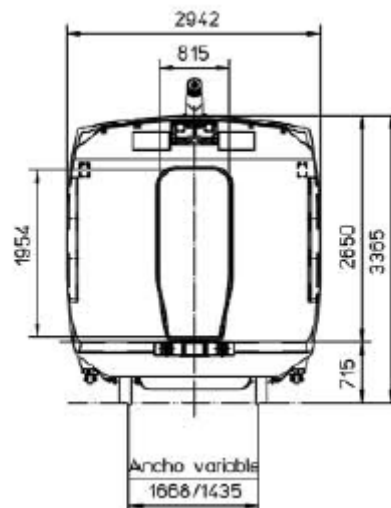


Figura 3. 4: Vista frontal locomotora.



3.2. MATERIALES.

El eje que se va a analizar a lo largo de todo el proyecto está fabricado en acero “**res 17-4 PH-H1025**” de resistencia a fluencia de 1000 MPa, resistencia última a rotura de 1069 MPa a temperatura ambiente (20°C) y densidad de $7.799 \times 10^{-9} \text{ Tn/mm}^3$, el módulo de young del material es de 196508 MPa.

Para simplificar nuestro análisis, hemos elegido unas ruedas que serán del mismo material que el eje a analizar (acero) ya que no se van a analizar estos componentes. En este caso hemos elegido el mismo acero que el eje (módulo elástico de 196508 MPa).

A continuación mostraremos la tarjeta nastran donde hemos especificado que nuestro modelo tenga las propiedades de este material, ver capítulo 2.2.2:

```
$ Referenced Material Records
$ Material Record : mat1.4
$ Description of Material:
MAT1  4  196508. 77365.4 .27  7.8-9
```



4. DESARROLLO MODELOS FEM Y RESULTADOS.

El objetivo de este proyecto es el de mostrar y explicar las técnicas que nos proporciona la herramienta de cálculo NASTRAN/PATRAN y en este caso vamos a desarrollar como se puede realizar un análisis detallado de un componente, en nuestro caso vamos a analizar un eje. Obteniendo los resultados como los niveles de concentración de tensiones que se produce en la superficie cuando aparece una grieta, ver la deformación de la grieta al ir aumentando de tamaño de la grieta debido a la carga máxima en estático que soporta la estructura, ver si existen cambios en la frecuencias propias de la estructura al aumentar el tamaño de la grieta.

El proceso de análisis, para poder obtener estos resultados van a ser necesario dos modelos FEM diferentes pero relacionados entre ellos, primero nos hará falta un modelo a escala real en el que se le aplicara los casos de carga necesarios y se le aplicaran las restricciones que el sistema tenga en la realidad, el problema de este modelo es que el nastran no calcula todo, tiene sus propias restricciones, estas restricciones vienen dadas por la potencia del ordenador y lo mas importante el tamaño del FEM, son muy influyentes para que nastran saque resultados correctos de un modelo:

- Tamaño del elemento.
- N° de nodos el modelo.
- N° de casos de carga.

Todos sabemos el tamaño que puede tener un eje de un tren (ver planos eje) “m”, y además también conocemos el tamaño que puede tener una grieta “mm” por lo que si tuviéramos que modelar el sistema a escala real con elementos con un tamaño en función de las dimensiones de una grieta, el número de elementos y de nodos se dispararía. No es una solución viable ya que el nastran tiene sus límites en el número de nodos y elementos por lo que el programa no convergería en una solución.

Por ello se ha pensado en modelar nuestro sistema a una escala relativamente pequeña pero no lo suficiente como para analizar estos defectos a la primera, este modelo lo utilizaríamos para analizar el “eje” y obtener resultados previos para un segundo análisis.

El segundo análisis se realizara generándonos un modelo local (DFEM) de la zona crítica, localizada gracias al modelo general.

Se extrae la zona crítica y se vuelve a remallar esta vez con un tamaño de elemento más pequeño lo suficiente para poder hacer un análisis detallado de las fisuras que pueden aparecer en nuestro eje de tren, para poder reproducir las condiciones de contorno y de cargas del modelo general se van a utilizar las tarjetas de desplazamientos forzados SPCD (ver explicación tarjetas nastran).

Los desplazamientos forzados; se extraen los desplazamientos del modelo GFEM a través de los nodos del contorno que va limitar nuestro modelo DFEM y estos desplazamientos son los que van ser las entradas de carga y las condiciones de contorno



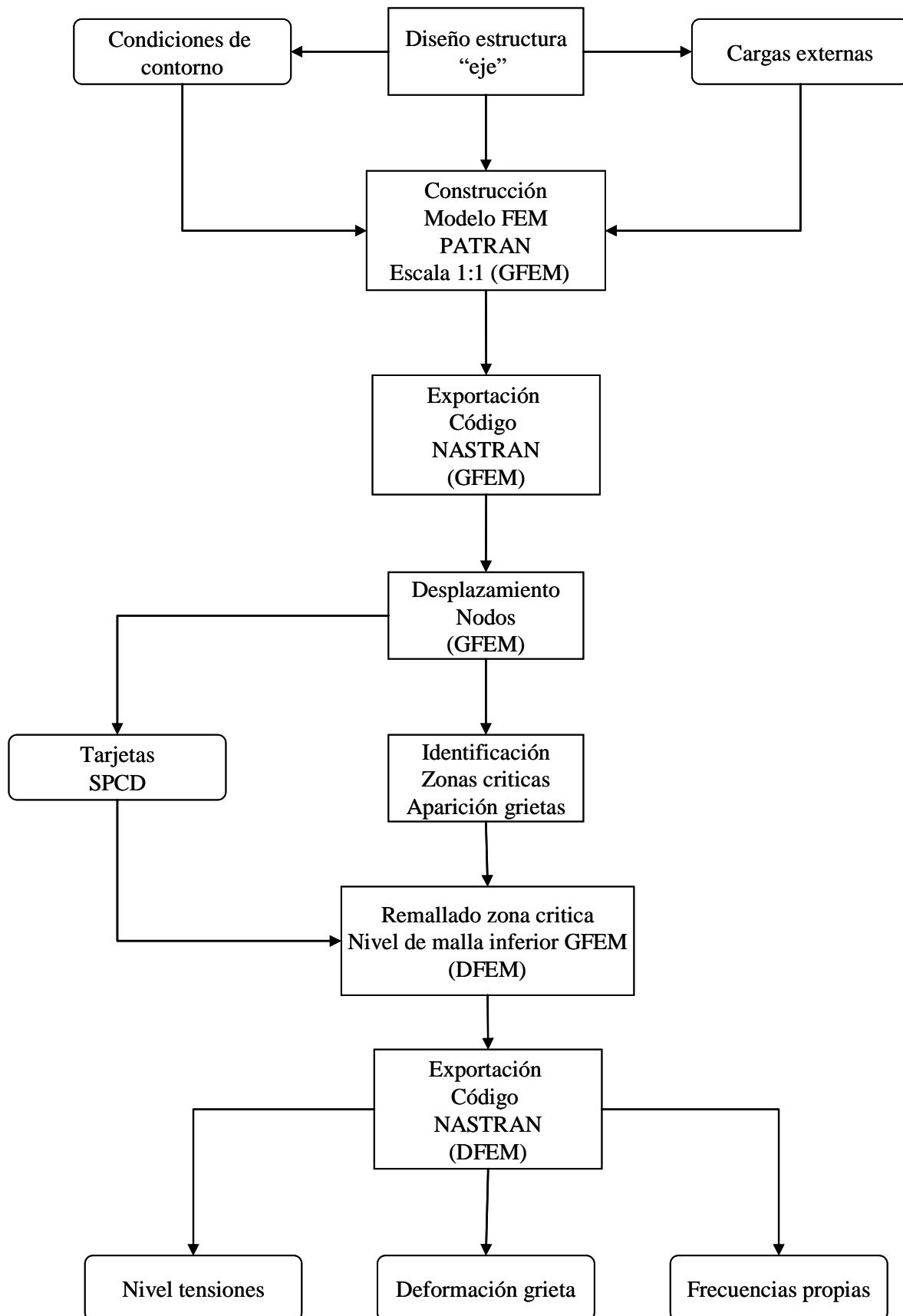
de nuestro nuevo modelo DFEM, las condiciones que debe cumplir el modelo local para que se puede llevar acabo esta técnica son las siguientes:

- Cuantos más nodos coincidan en los limites entre el modelo DFEM y GFEM mas exacto va a ser el resultado del modelo local.
- Los sistemas de referencia y de análisis de los nodos tanto del modelo DFEM como del GFEM deben de coincidir.
- Los elementos deben de tener las mismas propiedades en el GFEM como en el DEFM.

Estas condiciones se implantan en nuestro modelo gracias a las tarjetas SPCD que se han explicado en capítulos anteriores que son capaces de transmitir estas propiedades.

De esta manera seremos capaces de analizar nuestro modelo y obtener resultados fiables.

A continuación se va ha mostrar un organigrama que resume lo comentado en este apartado:



El modelo FEM tanto el GFEM como el DFEM se va a utilizar elementos sólidos, los elementos que vamos a utilizar son los “HEX8”.

NOTA:

Se podría utilizar para mallar los elementos “TETRA10” mucho más exactos a la hora de coger carga de flexión pero este tipo de elementos nos generaría una malla compleja y nos complicaría la implementación de las condiciones de contorno y además también nos traería problemas para generar el modelo local de la zona crítica.

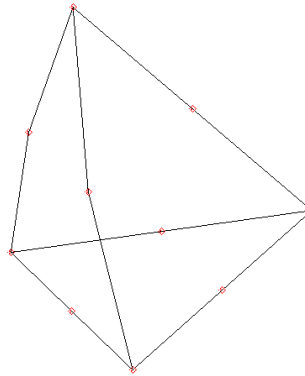


Figura 4. 1: Elemento sólido TETRA20.

Otra elección es el de utilizar “HEX20” elementos tan exactos como los tetra incluso serían adecuados para la implementación de las condiciones de contorno y el modelado del DFEM, pero al generar estos elementos duplicaríamos el número de nodos con lo que como explicamos en apartados anteriores mas tiempo de máquina y posible no convergencia del resultado, la variación entre un hex20 y un hex8 no varían mucho por lo que nos compensa utilizar el HEX8 para nuestro modelo.

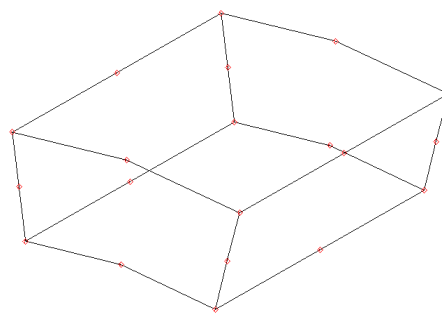


Figura 4. 2: Elemento sólido HEX20.

4.1. DESCRIPCIÓN DEL MODELO GLOBAL (GFEM).

4.1.1. DESCRIPCIÓN MODELO FEM.

El mallado del modelo global se va a realizar con elementos sólido (HEX8), con un tamaño de elemento de 10 mm x 10 mm x 10 mm, el sistema se desglosa en dos partes; principal y secundaria.

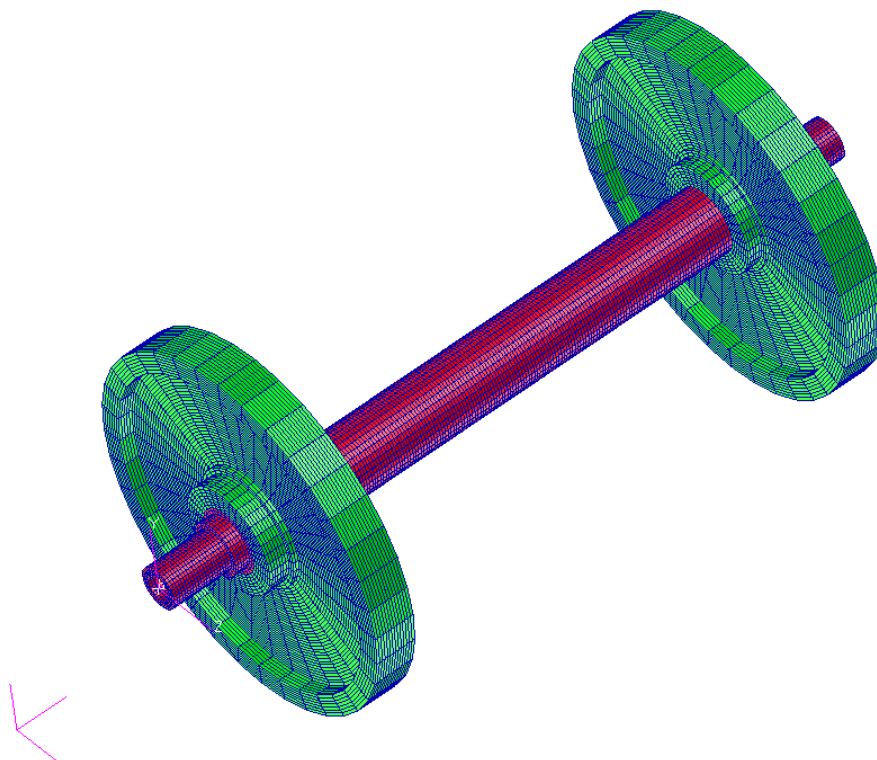


Figura 4. 3: Plot modelo Global FEM.

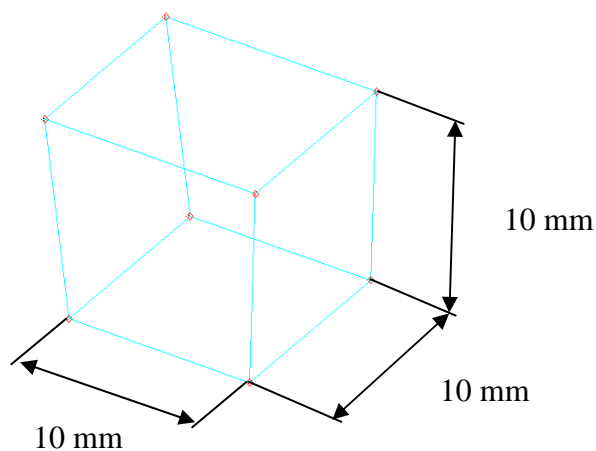


Figura 4. 4: Dimensiones elemento sólido HEXA8, modelo Global (GFEM).

- Componente principal: del cual se van a obtener resultados, en este caso el nombre de la pieza, “eje”, se puede ver en las siguiente figura:

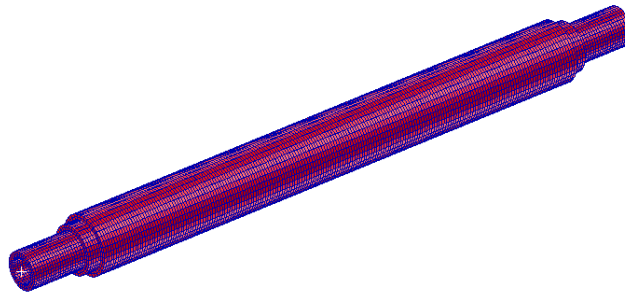


Figura 4. 5: FEM componente principal (GFEM).

- Componente secundario: se compone de los elementos que no van a ser estudiados pero estos forman una parte importante del sistema ya que marcan las condiciones de contorno del sistema a analizar, en este caso el nombre de las piezas, “ruedas”. Para unir el componente secundario con el principal, ya que son dos piezas independientes, se ha tomado la decisión de utilizar una unión rígida es decir se ha cosido los nodos coincidentes de la estructura principal y la de la secundaria como si se hubieran soldados las dos piezas, es una unión muy tosca pero es la más simple para obtener resultados fiables, se puede ver en las siguientes figuras:

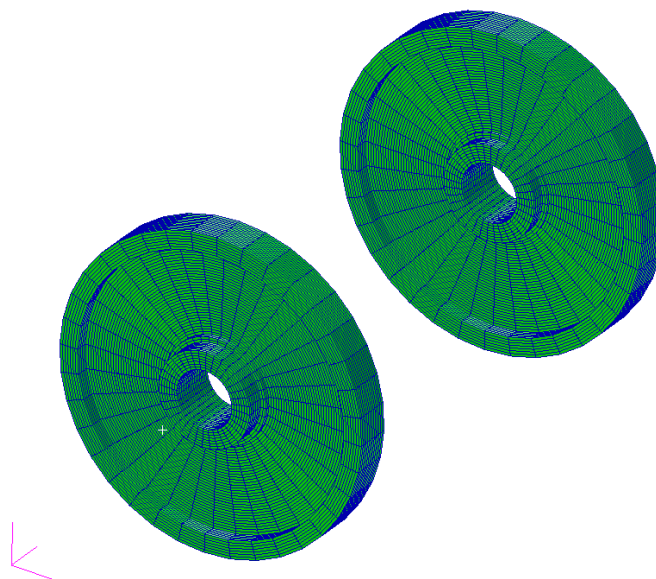


Figura 4. 6: FEM componente secundario (GFEM).

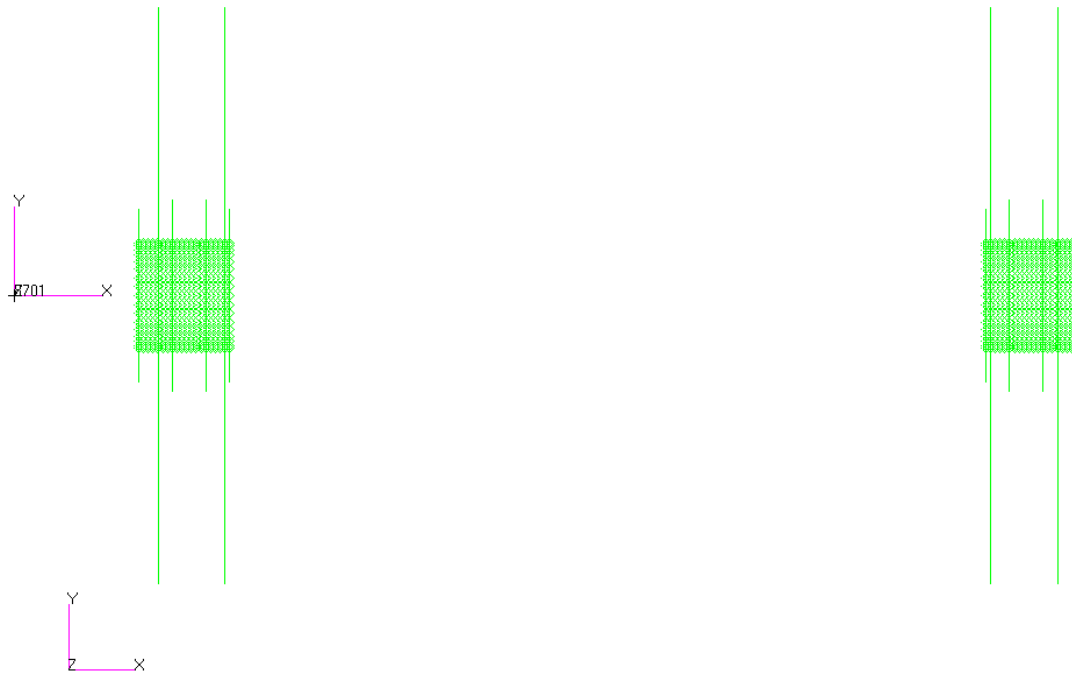


Figura 4. 7: Plot perfil Nodos de unión entre los dos modelos FEM (GFEM).

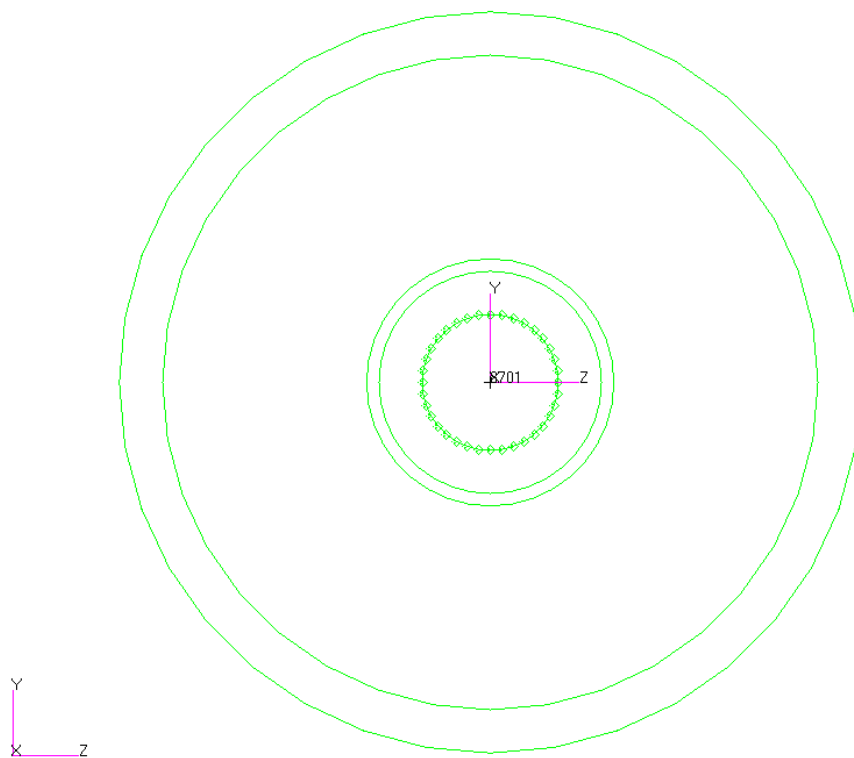


Figura 4. 8: Plot frontal Nodos de unión entre los dos modelos FEM (GFEM).

4.1.2. SISTEMA DE COORDENADAS.

Para definir la geometría del modelo se ha utilizado un único sistema de coordenadas RECTANGULAR “Sistema coordenadas 8701”.

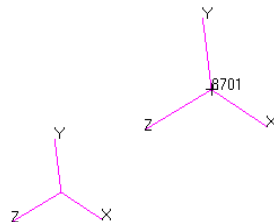


Figura 4. 9: Plot sistema de coordenadas “8701”.

\$ Referenced Coordinate Frames

CORD2R	8701	0.	0.	0.	0.	0.	1.
		1.	0.	0.			

Los ejes del sistema de coordenadas 8701 son paralelos al sistema de coordenadas “0” que tiene el programa por defecto.

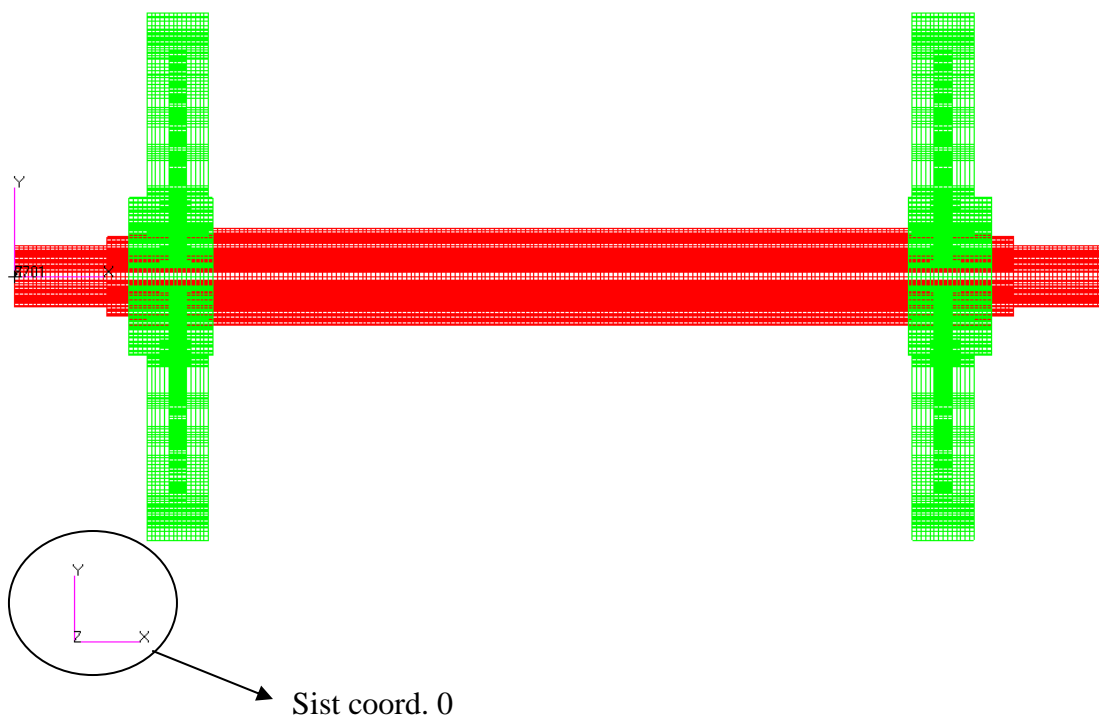


Figura 4. 10: Plot sistema de coordenadas “0”.

El sistema de coordenadas 8701 además de ser el sistema de referencia de los nodos que forman el modelo también es el sistema de análisis de estos, es decir, los desplazamientos y reacciones van a estar referenciados a este sistema de coordenadas.

4.1.3. DIMENSIONADO MODELO FEM.

Los programas de elementos finitos no son en sí programas de diseño por lo que representar superficies complejas en estos programas es complicado, se tendrían que importar de otros programas en formato “*.IGES” para poder utilizarlas como soporte para generar nuestra malla de elementos.

Nuestro modelo no tiene una geometría compleja por lo que no hará falta importar geometría del exterior, todo va a ser modelado a través del “PATRAN”, no se va a poder representar pendientes, estas se modelan con cambios de sección.

Los cambios de sección en ejes generan zonas de concentración de tensiones, pero no nos influyen porque no vamos a leer resultados en estas zonas.

La geometría del modelo FEM del componente principal se puede ver en la siguiente figura:

Todas las cotas están “mm”

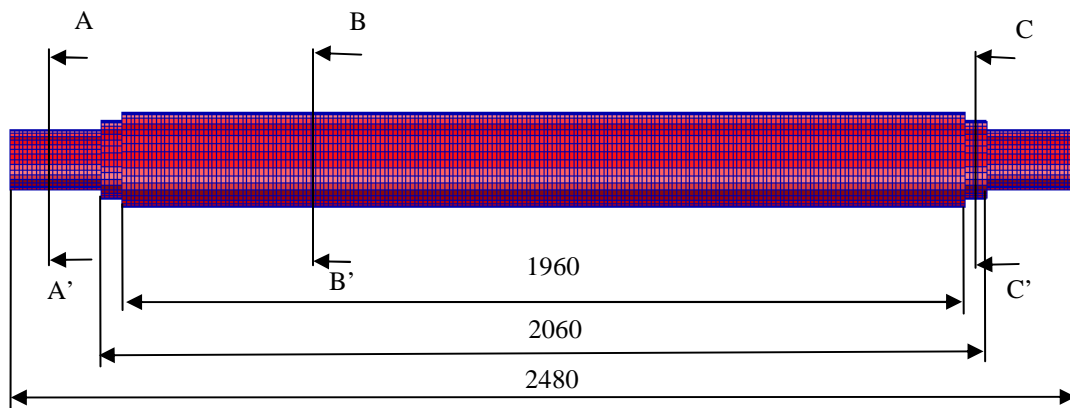


Figura 4. 11: Dimensionado FEM componente principal (GFEM).

Sección A-A':

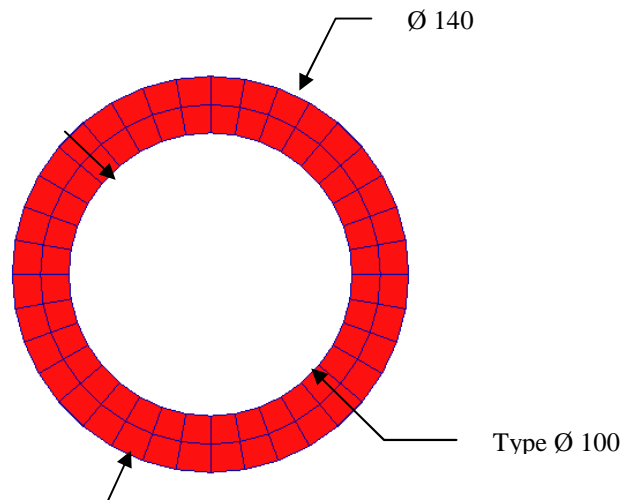


Figura 4. 12: Dimensionado FEM sección A-A' (GFEM).

Sección B-B':

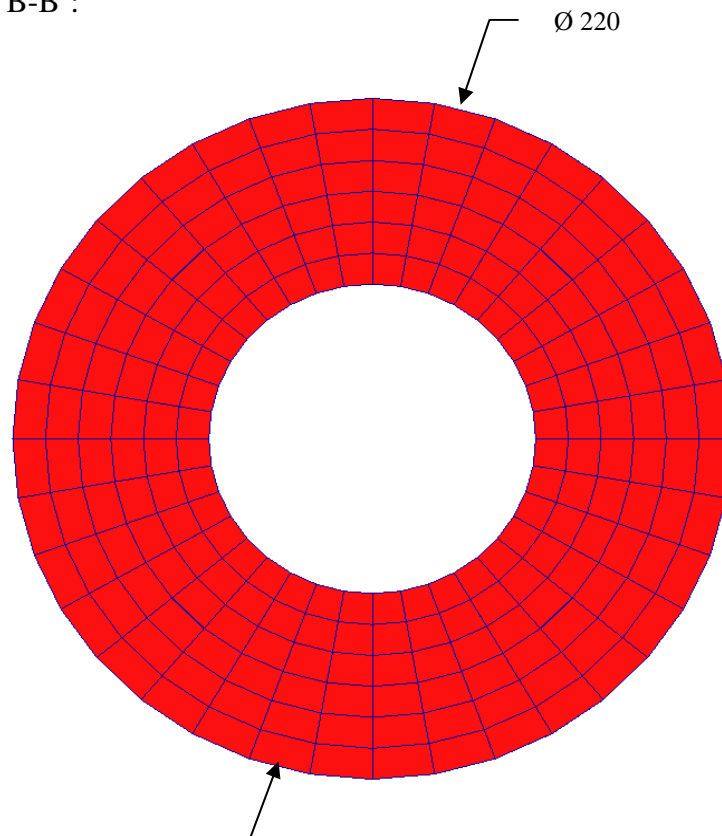


Figura 4. 13: Dimensionado FEM sección B-B' (GFEM).

Sección C-C':

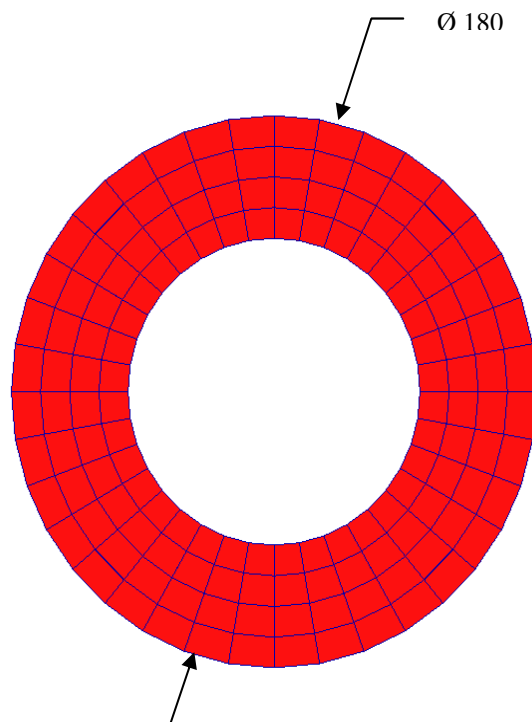


Figura 4. 14: Dimensionado FEM sección C-C' (GFEM).

La geometría del modelo FEM del componente secundario es más sencilla, además esta solo se va a utilizarse para aportar rigidez al sistema y modelizar las condiciones de contorno más realista posible para el posterior análisis del componente principal, el dimensionado se puede ver en la siguiente figura:

El componente secundario esta formado por dos modelos simétricos, solo acotaremos uno de ellos.

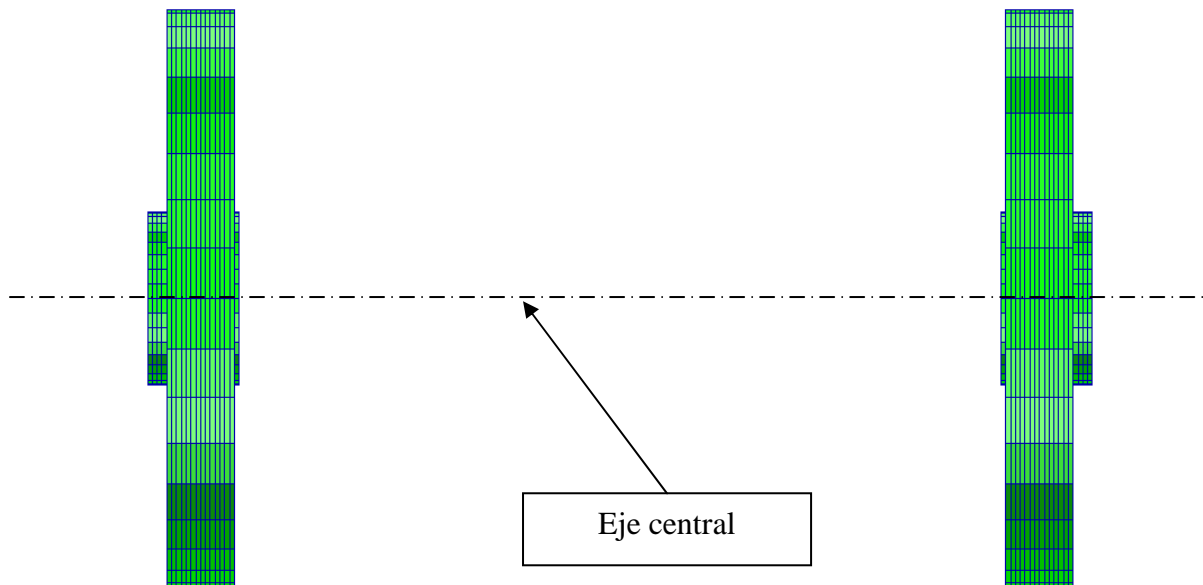


Figura 4. 15: Plot componentes FEM componente secundario (GFEM).

El componente secundario es un perfil de revolución que se desarrolla sobre el eje que se puede ver en la imagen anterior, a continuación se puede ver el corte de la sección de revolución:

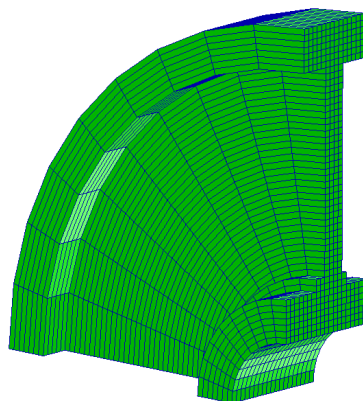
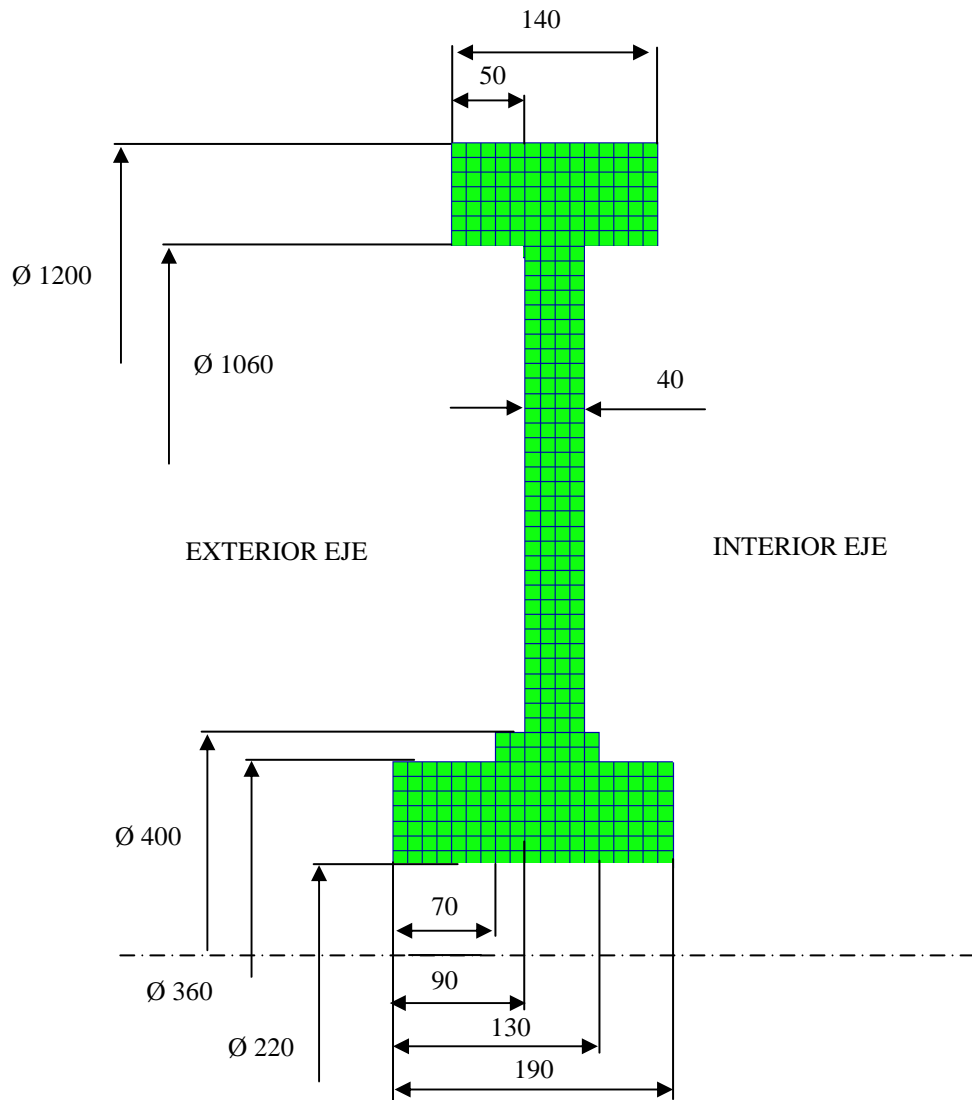
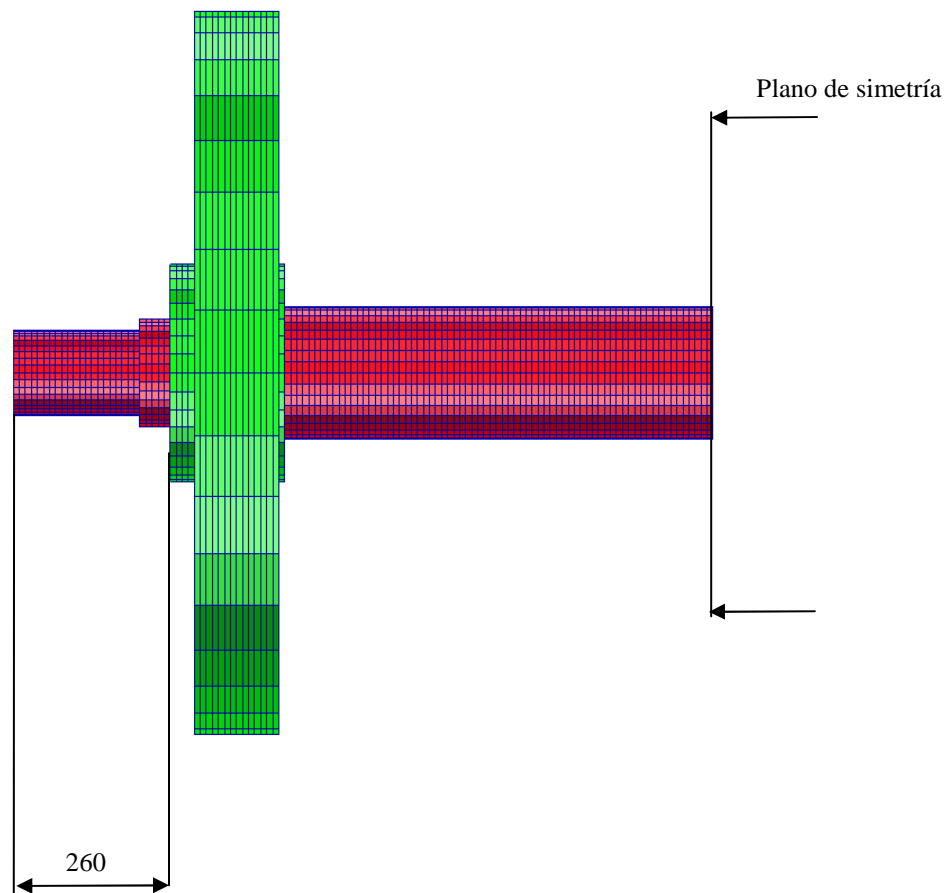


Figura 4. 16: Sección FEM componente secundario (GFEM).



Todas las cotas están "mm"

Figura 4. 17: Dimensionado FEM componente secundario (GFEM).



Todas las cotas están “mm”

Figura 4. 18: Zona en voladizo del componente principal (GFEM).

4.1.4. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO (GFEM).

A continuación se mostrará un resumen del modelo global, en el que detalla las características generales del modelo. Este resumen se encuentra en el fichero de texto *.f06.

MODEL SUMMARY

NUMBER OF GRID POINTS = 87373

NUMBER OF CHEXA ELEMENTS = 73944

4.1.5. CARGAS EXTERNAS.

La carga aplicada sobre el eje va a ser el máximo peso que pueda soportar, en este caso **20 tn** (ver características del tren), estas cargas se van a repartir inicialmente de forma equitativa en los puntos de apoyo de la amortiguación de la locomotora “cojinetes de rodaje” (ver Figura3.1).

Eje en voladizo, distribución de cargas sobre el eje:

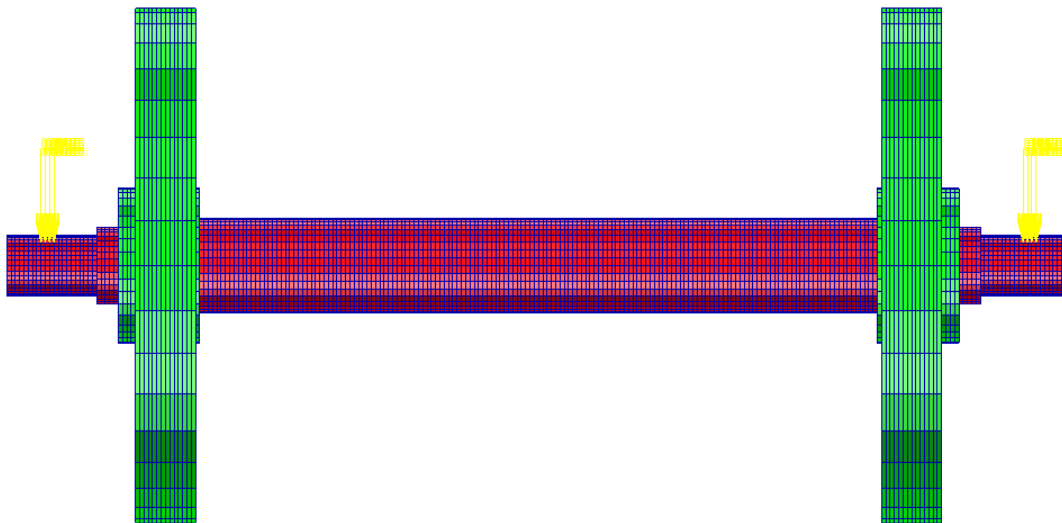


Figura 4. 19: Cargas externas aplicadas al modelo global (GFEM).

El eje (componente principal) tiene las siguientes propiedades físicas, masa, volumen, etc.

Group Display of Center of Gravity, Principal Inertias, Radii of Gyration, Mass, and Volume						
	CG(CID 0)	CG(CID 8701)	I-Principal	Radii of Gyr.	Mass	Volume
1-prop.psolid.1	1.240E+003	1.240E+003	1.941E+005	6.250E+002	4.970E-001	6.371E+007
2	-2.50E-009	-2.50E-009	1.941E+005	6.250E+002		
3	-1.82E-009	-1.82E-009	3.494E+003	8.385E+001		

Expanded Cell Value	
Mass Property Display Option <input checked="" type="radio"/> Mass, CG, Principal Inertias, and Others <input type="radio"/> Inertia Tensor <input type="radio"/> Inertia Tensor at CG	
<input type="radio"/> Principal Directions in User-Specified Frame <input type="radio"/> Principal Directions in Ref. Cartesian Frame	
Cancel	

Figura 4. 20: Plot propiedades modelo FEM componente principal (GFEM).



Unidades:

MASS = Toneladas

VOLUMEN = mm³

CG (centro de gravedad, desde el sistema de coordenadas seleccionado) = mm

I-PRINCIPAL (inercia principal) = mm⁴

No se ha considerado la gravedad como carga externa ya que por orden de magnitud esta carga no va a ser relevante, aunque el eje esté en voladizo.

Justificación de la exclusión de la fuerza de la gravedad:

$$\text{Gravedad} = 10000 \text{ mm/s}^2$$

$$\text{Masa eje} = 0.497 \text{ Tn}$$

$$\text{Fuerza} = 0.497 \cdot 10000 = 4970 \text{ N}$$

$$\text{Masa cabina tren} = 20 \text{ Tn}$$

$$\text{Fuerza} = 20 \cdot 10000 = 200000 \text{ N}$$

Se puede observar la diferencia entre las dos fuerzas.

$$\text{Ratio} = \frac{200000}{4970} = 40.24$$

El peso de la cabina es 40 veces superior al propio peso del eje, además la carga proveniente de la gravedad es una fuerza distribuida por todo el eje y la fuerza proveniente del peso de la cabina es más localizado por lo que generará aun más daño a nuestro componente. Por este motivo hemos descartado para nuestro análisis la fuerza de gravedad. De esta manera simplificaremos el estudio y ahorraremos tiempo de cálculo de ordenador.

Nuestra carga, el peso de la cabina, con un valor total de 200000 N, va estar aplicada a través de los cojinetes de rodaje (ver figura 3.1), por lo que estará distribuida en dos zonas (ver figura 4.19).

La carga aplicada en la cara externa del eje va a estar distribuida en una superficie acorde al ancho del cojinete.

Nosotros no conocemos que tipo de cojinetes se usan para este cometido en la industria ferroviaria, lo que si conocemos es la zona donde van a estar montados. Para un estudio completo es importante saber donde se aplica y como estaría distribuida la carga sobre el eje, pero para un análisis inicial nos sirve utilizar un ancho de **30 mm**.

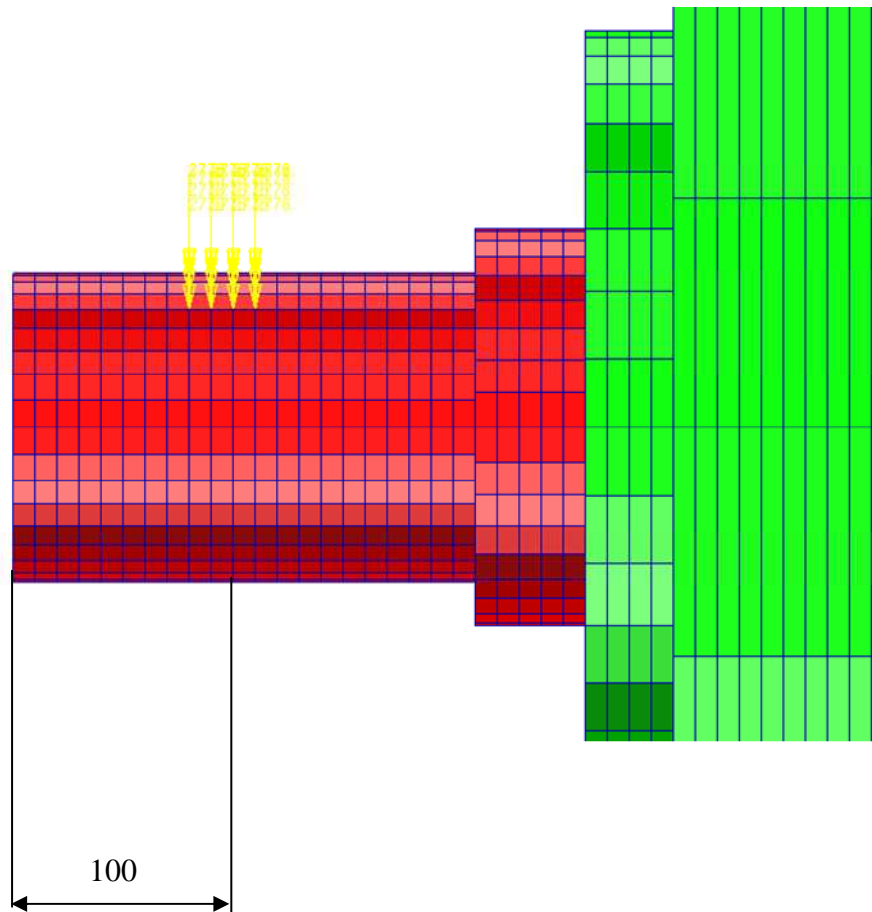


Figura 4. 21: Distancia aplicación carga externa del componente principal (GFEM).

Todas las cotas están “mm”

La carga estará distribuida de la siguiente manera.

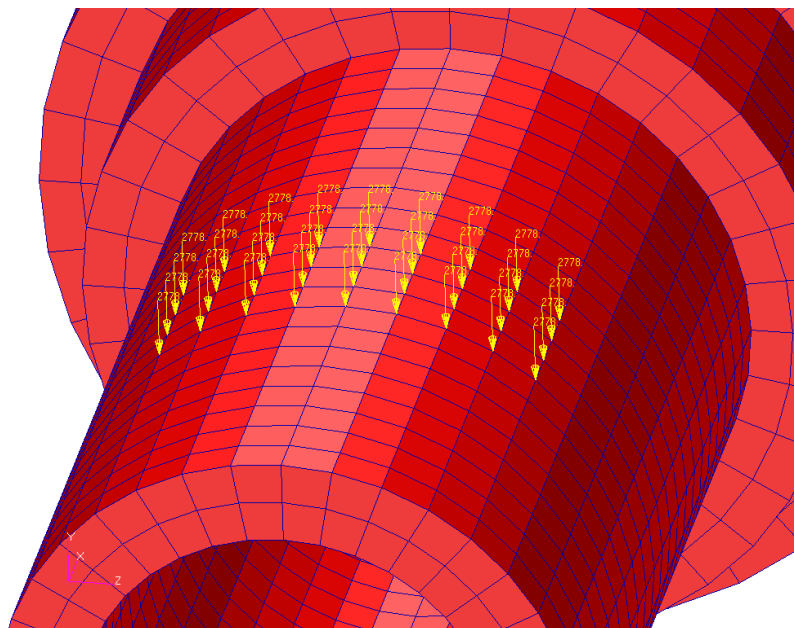


Figura 4. 22: Plot distribución carga sobre el componente principal (GFEM).

La carga que se va aplicar es de 100000 N por cojinete. Hemos utilizado para el análisis un cojinete con un ancho de **30 mm** y un diámetro interior de **140 mm**.

La carga se va a distribuir en una superficie aproximada de 2932 mm². Es el área de presión que ejercería el cojinete sobre la superficie de nuestro eje.

Para nuestro estudio distribuiremos la carga de presión que ejerce la cabina sobre el eje en fuerzas puntuales, que distribuiremos sobre la anterior superficie. Las cargas puntuales se aplican sobre los nodos que abarcan esta superficie, en nuestro caso 9 filas y 4 columnas, la carga se distribuirá en 36 nodos (ver figura 4.22)

CARGA APLICADA

36 nodos

$$F = 100000 / 36 = 2778 \text{ N por cada nodo.}$$

El sistema de referencia de estas fuerzas será el mismo que para el dimensionado de estas, en nuestro caso el “sistema coordenadas **8701**”.

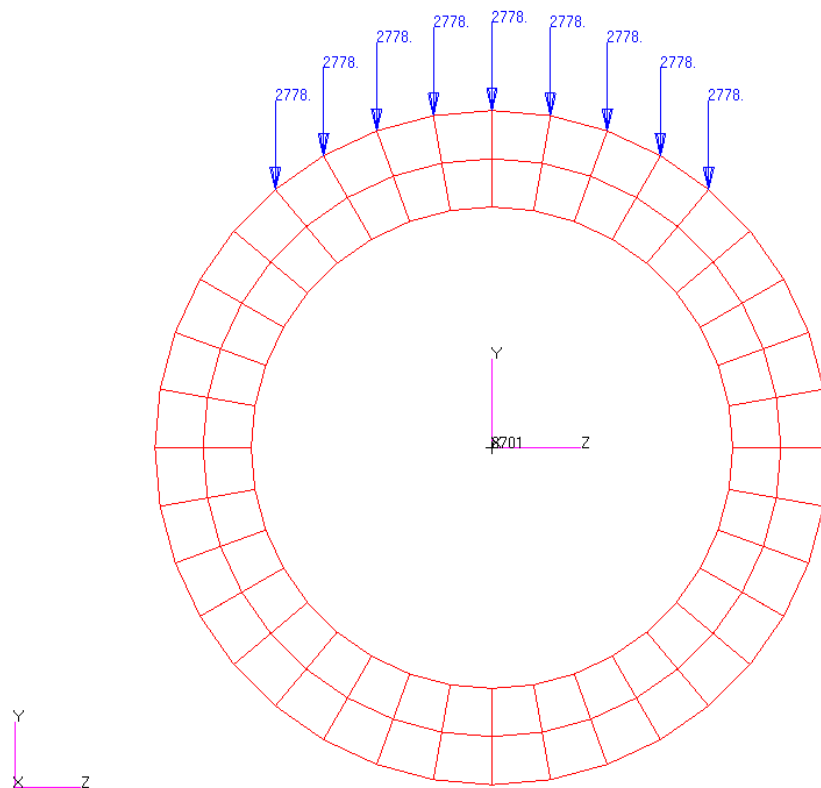


Figura 4. 23: Plot distribución y magnitud carga sobre el componente principal (GFEM).



A continuación mostraremos la tarjeta nastran con las fuerzas aplicadas, ver capítulo 2.2.2:

\$ Nodal Forces of Load Set : fuerza_cojinetes

FORCE	1100	101632	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101633	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101634	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101635	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101636	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101684	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101685	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101686	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101687	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101740	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101741	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101742	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101743	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101744	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101792	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101793	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101794	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101795	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101848	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101849	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101850	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101851	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101852	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101900	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101901	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101902	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101903	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101956	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101957	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101958	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101959	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	101960	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	102008	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	102009	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	102010	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	102011	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154732	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154733	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154734	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154735	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154736	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154784	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154785	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154786	8701	2778.	0.	-1.	0.



FORCE	1100	154787	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154840	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154841	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154842	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154843	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154844	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154892	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154893	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154894	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154895	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154948	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154949	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154950	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154951	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	154952	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155000	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155001	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155002	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155003	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155056	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155057	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155058	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155059	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155060	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155108	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155109	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155110	8701	2778.	0.	-1.	0.
FORCE	1100	155111	8701	2778.	0.	-1.	0.

4.1.6. CONDICIONES DE CONTORNO.

Las ruedas están apoyadas en los raíles, de dimensiones según norma ferroviaria. Estos raíles no están dentro de nuestro sistema pero se tienen en cuenta para aplicar las restricciones de movimiento.

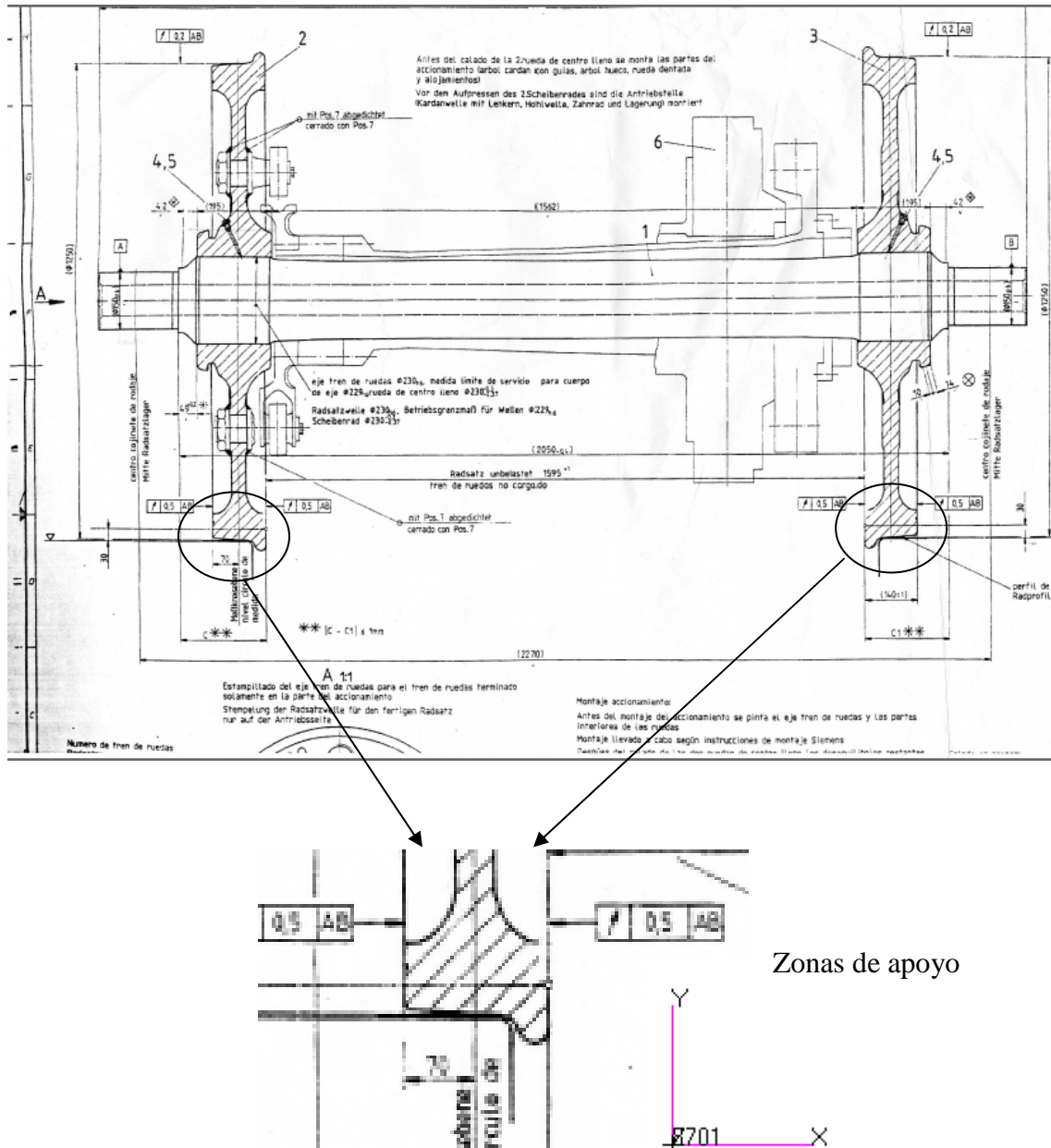


Figura 4. 24: Zonas de restricción de movimiento (GFEM).

Se puede observar en la figura 4.24 el detalle que visualiza la zona de apoyo de la rueda sobre el rail, este restringe el movimiento de la rueda en dos grados de libertad con respecto al sistema de referencia 8701.

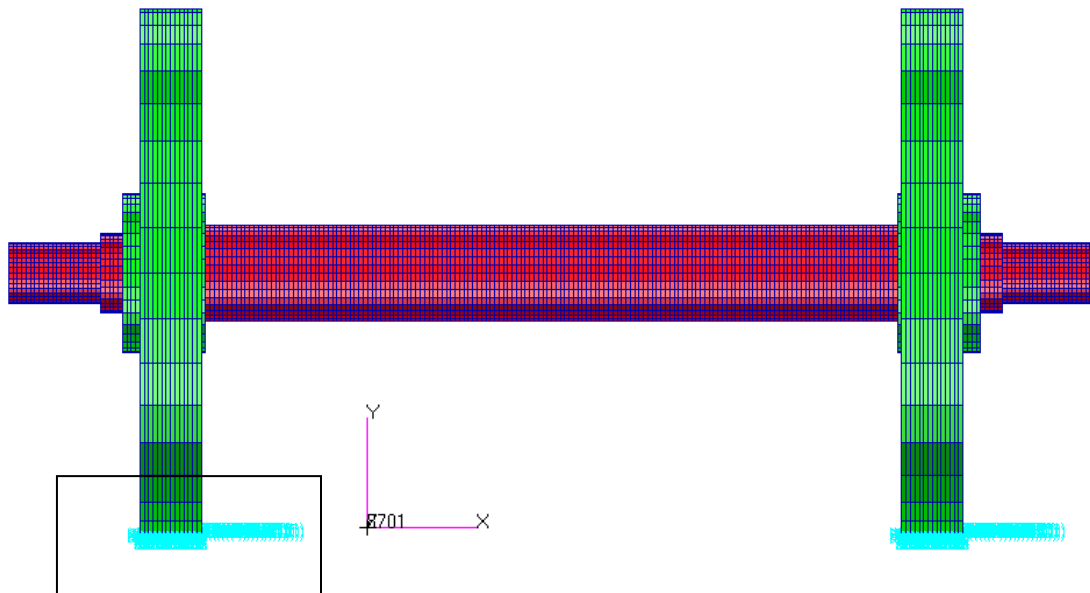
La geometría de la rueda y del rail restringe el movimiento en el eje "X" y en el eje "Y" y las rotaciones en los ejes "Z" y "Y".

El único grado de libertad que no está restringido es el desplazamiento en “Z” que coincide con la dirección de desplazamiento del tren y el giro en “X” corresponde a la rotación de la rueda.

Nosotros vamos a desarrollar un análisis estático del eje, para que a la hora de analizar nuestro modelo no nos dé un fallo de mecanismo (grados de libertad no restringidos), vamos a restringir los tres componentes transnacionales de los nodos, es decir restringimos, las componentes “X, Y, Z”, por lo que generaremos unos apoyos **híper estático**.

Las componentes que corresponden a los giros no va hacer falta restringirlos debido a la geometría del apoyo.

A continuación se mostraran las partes del modelo que se han restringido:



DETALLE A

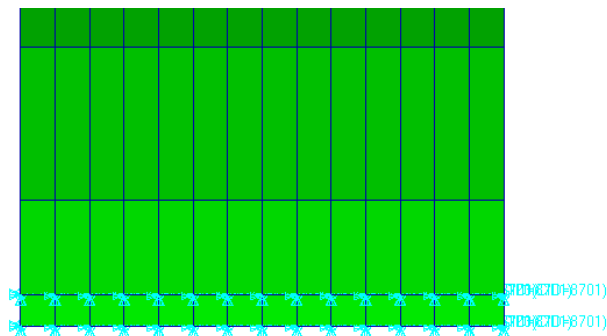
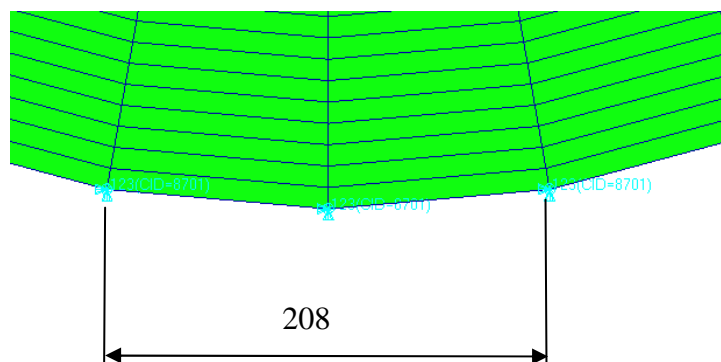
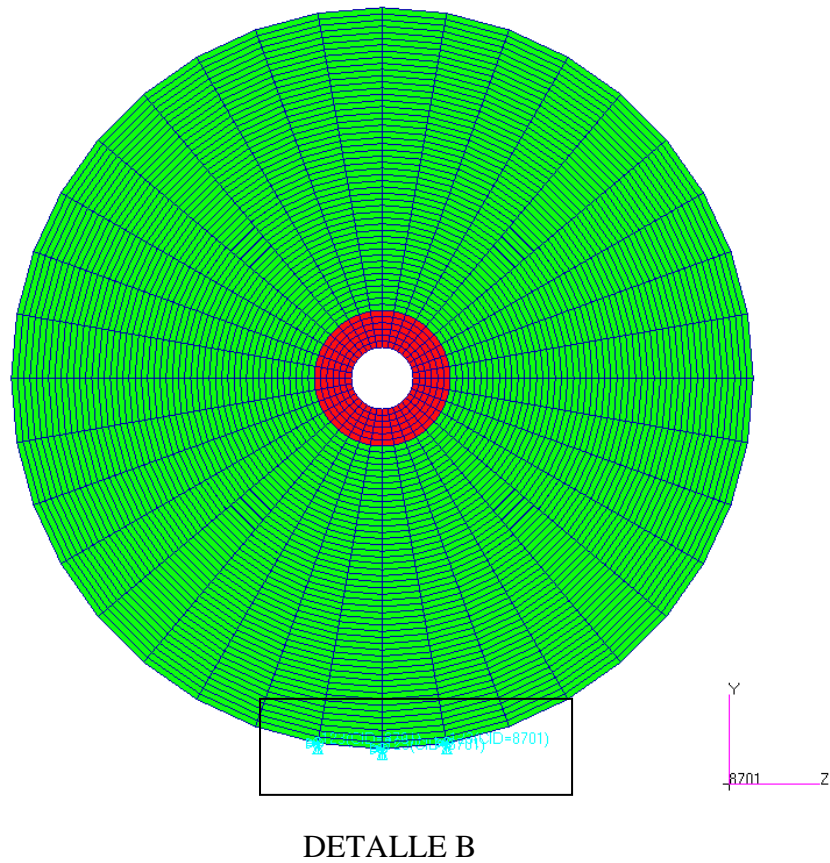


Figura 4. 25: Condiciones de contorno (GFEM).



Todas las cotas están “mm”

Figura 4. 26: Detalle condiciones de contorno (GFEM).



En la figura de detalle B se puede observar que se ha cogido como zona de apoyo una longitud de **208 mm**, es una distancia poco realista ya que el área de apoyo de la rueda sobre el rail esta en un orden de 1 a 2 cm².

Se ha cogido esta distancia como una primera estimación para nuestros análisis, en este proyecto solo se van a desarrollar los métodos de análisis que nos proporciona el NASTRAN. En estudios futuros esta metodología podrá ser utilizada como orientación a otros analistas que deseen desarrollar un estudio más exhaustivo de este tipo de estructuras.

Como la precisión en los elementos finitos esta restringida al tamaño de los elementos se ha cogido una longitud muy amplia, de todas formas esta longitud no va a ser relevante en los resultados de nuestros cálculos ya que la hipótesis de las condiciones de contorno es restringir los desplazamientos en los tres grados de libertad del sistema completo y nuestro análisis detallado se va a desarrollar en el componente principal (eje) que se encuentra muy lejos de las condiciones de contorno.

A continuación se mostraran las tarjetas nastran utilizadas para modelar estas condiciones de contorno (ver capítulo 2.2.2).

\$ Displacement Constraints of Load Set : spc

```
SPC1  10  123  3013151 3013152 3013232 3013455 3013456 3013520
      3013743 3013744 3013808 3014031 3014032 3014096 3014319 3014320
      3014384 3014607 3014608 3014672 3014895 3014896 3014960 3015183
      3015184 3015248 3015471 3015472 3015536 3015759 3015760 3015824
      3016047 3016048 3016112 3016335 3016336 3016400 3016623 3016624
      3016688 3016911 3016912 3016976 3017199 3017200 3017264 3029763
      3029764 3029828 3030051 3030052 3030116 3030339 3030340 3030404
      3030627 3030628 3030692 3030915 3030916 3030980 3031175 3031176
      3031232 3031427 3031428 3031484 3031679 3031680 3031736 3031931
      3031932 3031988 3032183 3032184 3032240 3032463 3032464 3032528
      3032751 3032752 3032816 3033039 3033040 3033104 3033327 3033328
      3033392 3033615 3033616 3033680
```

4.1.7. ANÁLISIS Y RESULTADOS MODELO GLOBAL (GFEM).

Se ha analizado el modelo GFEM con el **NASTRAN 2005** utilizando una SOL 101 (ver capítulo 2.2.3) análisis **LINEAL**.

De este modelo obtendremos los desplazamientos máximos producidos por las cargas explicadas en el capítulo 4.1.5, podremos observar y encontrar las zonas críticas del modelo.

Después de localizar las zonas críticas podremos pasar a ejecutar la segunda parte de nuestro análisis, que sería modelizar el modelo detallado (DFEM) de esta zona afectada.

A continuación mostraremos un Plot de la deformada general del modelo global:

MSC.Patran 2005 23-Oct-11 21:32:54

Deform: ESTATICO_CAS01, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)

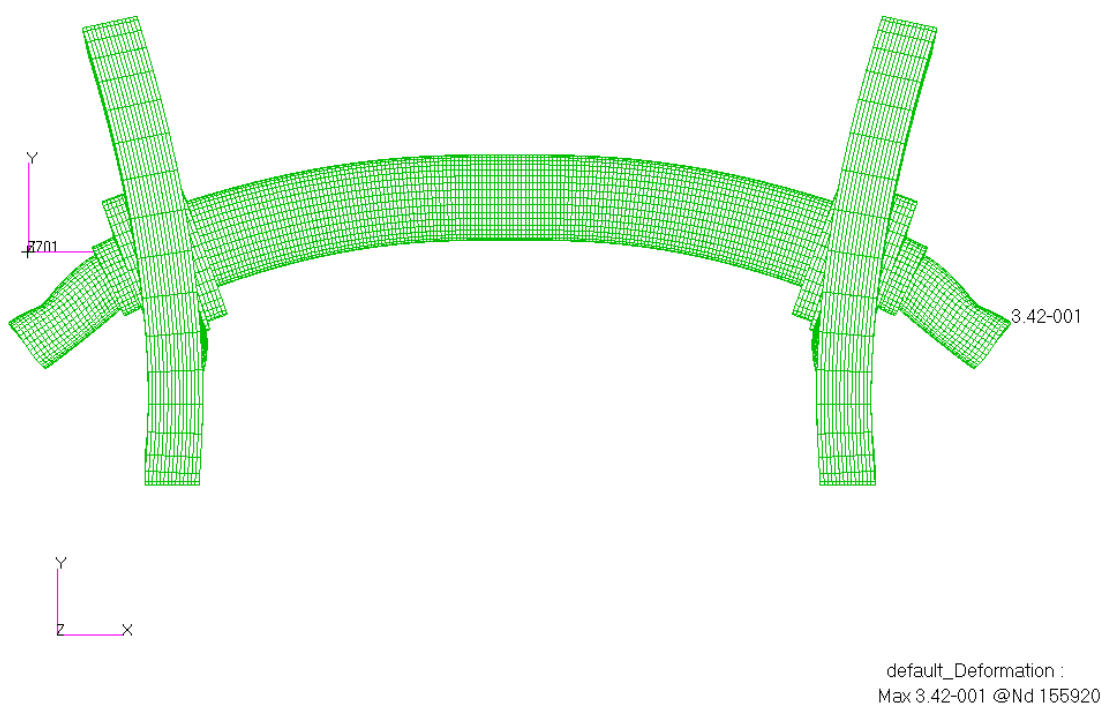


Figura 4. 27: Deformación máxima modelo global (GFEM).

Deformación máxima de **0.342 mm**

El análisis del modelo global lo dividiremos en dos partes:

1. Deformación de zona central del eje.
2. Deformación de los laterales que están en voladizo.

La deformación máxima en el centro del eje es de:

MSC.Patran 2005 23-Oct-11 22:20:02
Deform: ESTATICO_CAS01, Static Subcase, Displacements, Translational, , (NON-LAYERED)

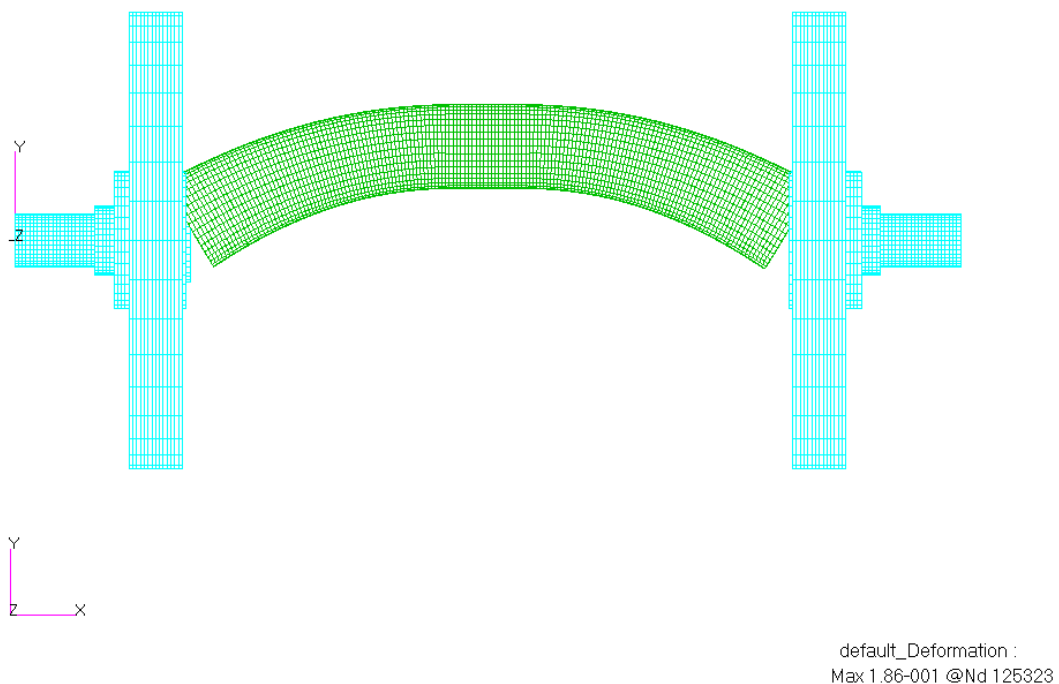


Figura 4. 28: Deformación zona central modelo global (GFEM).

Deformación máxima del centro del eje **0.186 mm**



La deformación máxima de los laterales en voladizo se puede ver en el Plot del modelo global, **0.342 mm**, la zona crítica esta en la parte del eje que esta en el aire.

La rigidez que aporta la rueda hace que los laterales se comportaran como vigas en voladizo.

La zona crítica saldrá de los laterales, por lo que plantearemos el equilibrio de fuerzas y obtendremos la distribución de momentos a lo largo de la zona seleccionada. Con esta distribución y con las secciones de las zonas afectadas conoceremos el nivel de tensiones a lo largo de la zona afectada, de esta forma podremos seleccionar la zona crítica para la segunda parte del análisis.

Sabemos que las tensiones en la superficie de un eje de sección circular, en un estado de carga a flexión son:

$$\sigma = \sigma_{flexion} + \sigma_{traccion} \Rightarrow \frac{M}{I} \cdot \frac{y}{2} + \frac{F}{A}$$

Donde:

M = momento flector provocado por la carga aplicada a través de los cojinetes

I = inercia de la sección analizada.

y = cota máxima en este caso radio exterior

F = fuerza normal a la superficie de la sección.

A = área de la sección a estudiar

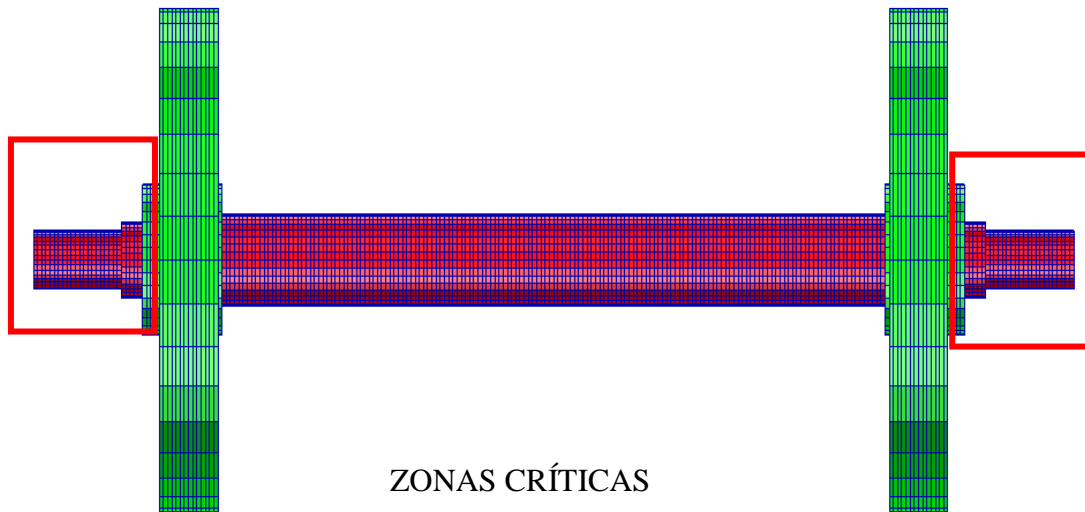


Figura 4. 29: Zonas críticas modelo global (GFEM).

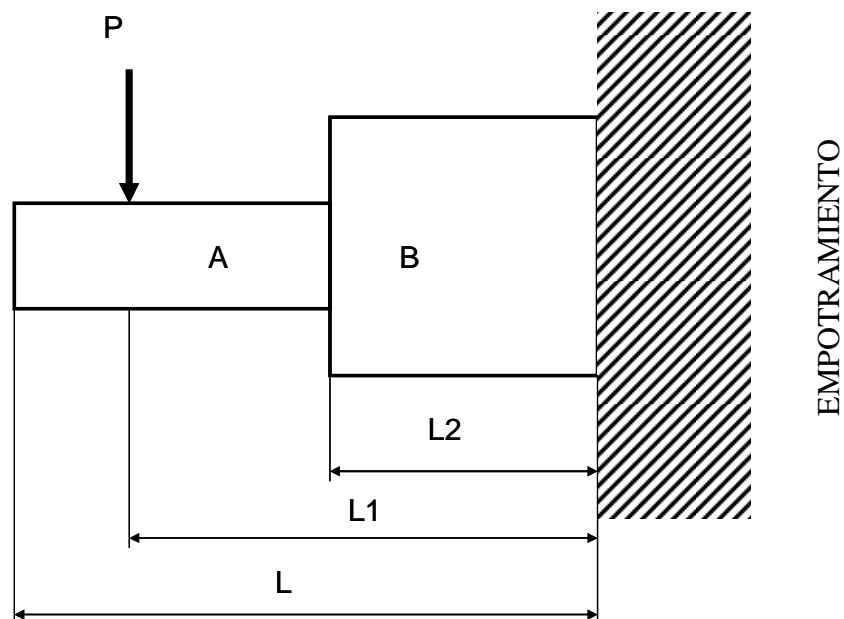


Figura 4. 30: Representación zona crítica análisis analítico para cálculo de tensiones (GFEM).

Donde:

$$P = 100000 \text{ N}$$

$$L = 260 \text{ mm}$$

$$L1 = 160 \text{ mm}$$

$$L2 = 50 \text{ mm}$$

A = sección del eje (ver figura 4.10)

B = sección del eje (ver figura 4.12)

Calculamos reacciones en los apoyos:

CORTANTES

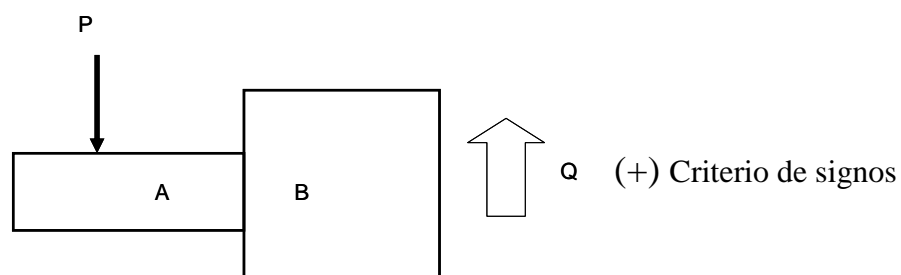


Figura 4. 31: Cálculo fuerza vertical en el empotramiento (GFEM).

MOMENTOS

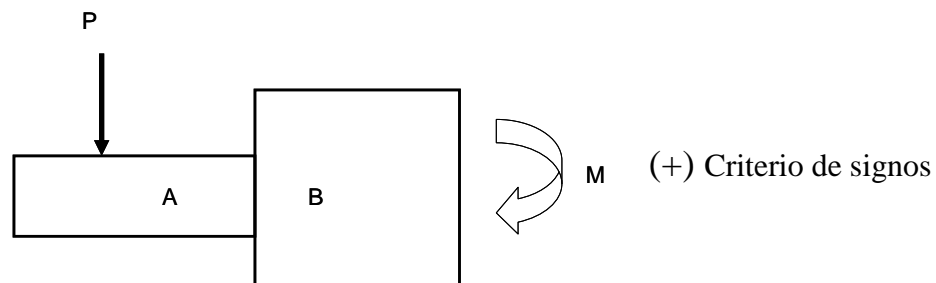


Figura 4. 32: Cálculo de momentos en el empotramiento (GFEM).

NORMALES

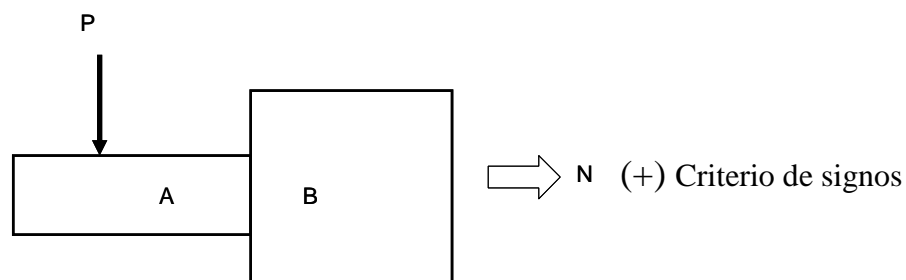


Figura 4. 33: Cálculo de fuerzas normales en el empotramiento (GFEM).

Aplicamos el equilibrio de fuerzas en la zona de empotramiento;

$$\sum Q = 0 ; \sum N = 0 ; \sum M = 0$$

Equilibrio de cortantes

$$Q = P$$

Equilibrio de normales

$$N = 0$$

Equilibrio de momentos

$$M = P \cdot L_1$$

A continuación se calculara la distribución de esfuerzos a lo largo de nuestra barra.

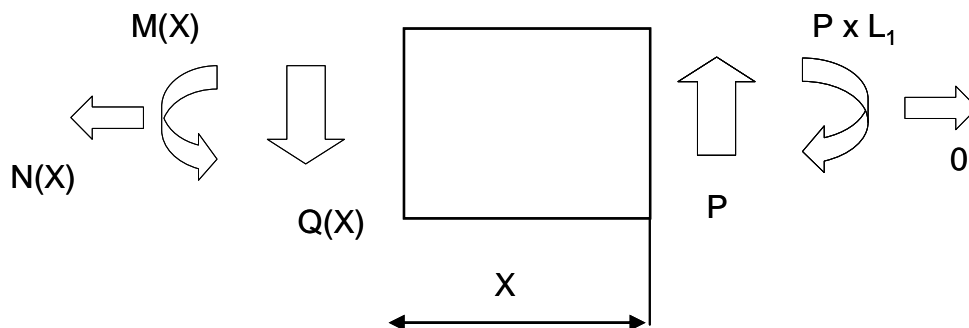


Figura 4. 34: Reacciones en la zona crítica (GFEM).

Esfuerzos CORTANTES.

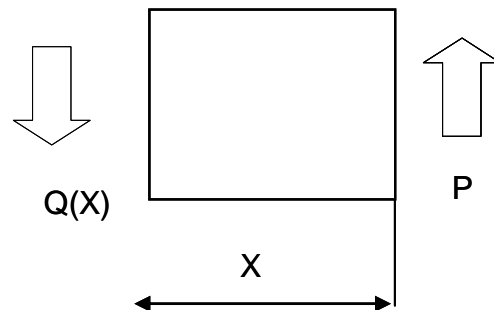


Figura 4. 35: Distribución esfuerzos cortantes (GFEM).

Según el equilibrio de fuerzas, el esfuerzo vendrá definido de la siguiente manera:

$$Q(X) = P$$

Es un esfuerzo constante a lo largo de la viga.

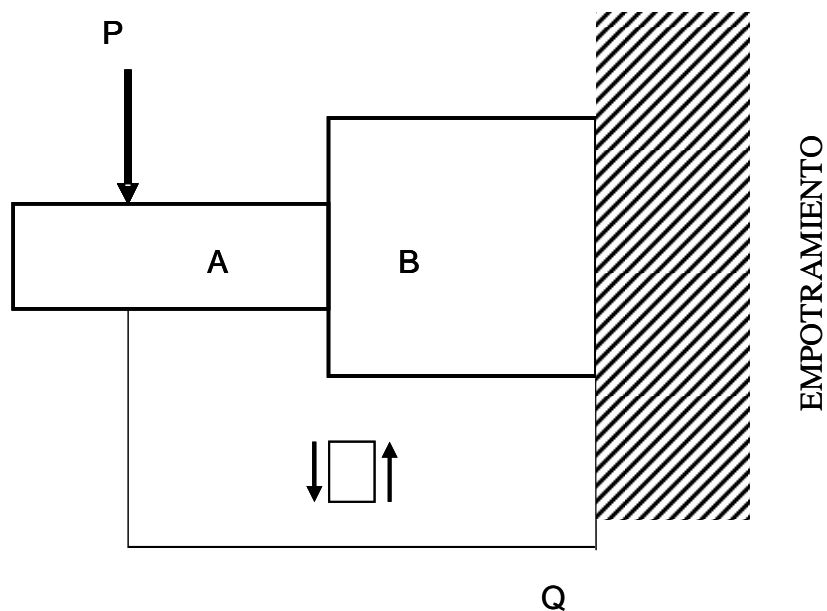


Figura 4. 36: Diagrama esfuerzos cortantes (GFEM).

Esfuerzos FLECTORES.

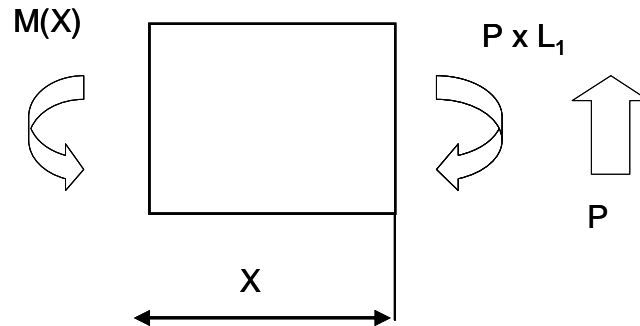


Figura 4. 37: Distribución esfuerzos flectores (GFEM).

Según el equilibrio de fuerzas, el esfuerzo vendrá definido de la siguiente manera:

$$M(X) = P \cdot L_1 - P \cdot X \Rightarrow M(X) = P \cdot (L_1 - X)$$

Es un esfuerzo distribuido en función de la longitud a lo largo de la viga.

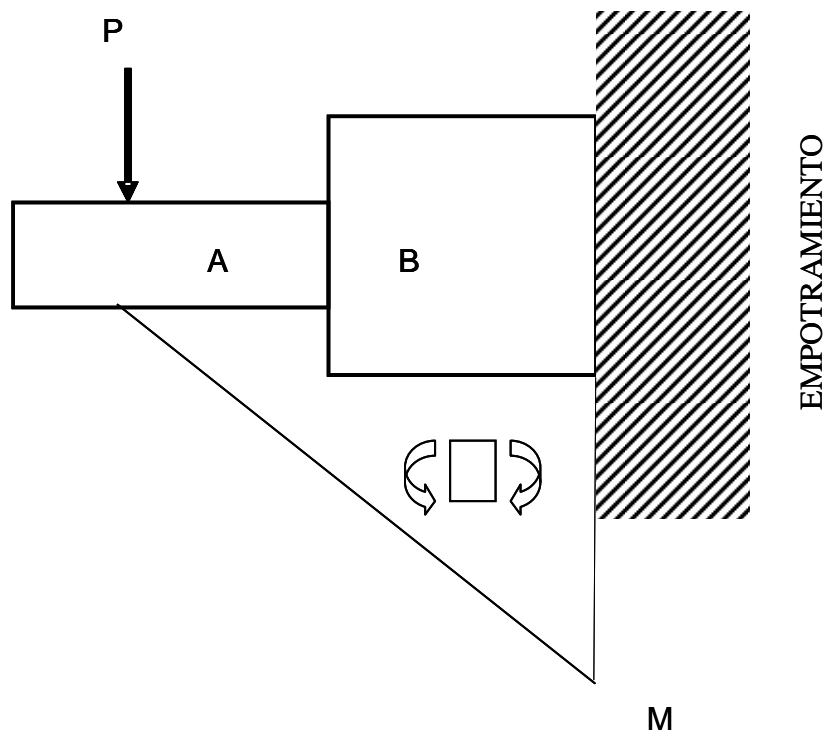


Figura 4. 38: Diagrama esfuerzos flectores (GFEM).



Donde:

$$M(X)_{\max} = X = 0 \Rightarrow P \cdot (L_1 - 0) = P \cdot L_1$$

$$M(X)_{\min} = X = L_1 \Rightarrow P \cdot (L_1 - L_1) = 0$$

La tensión proveniente del esfuerzo flector vendrá calculada por la siguiente formulación:

$$\sigma = \frac{M(x)}{I} \cdot \frac{y}{2}$$

Donde:

σ = Tensión en la superficie de la pieza (MPa)

$M(x)$ = Momento flector en función de la longitud de la barra (Nmm)

I = Inercia de la sección analizada, sistema de coordenadas “8701” $I_z = I_y$ (mm⁴)

Y = Radio exterior de la sección (mm);

En nuestro caso tendremos dos secciones:

Sección A:

$$I_A = \frac{\pi}{4} \cdot (R_{\text{ext}}^4 - R_{\text{int}}^4)$$

R_{ext} = Radio de la sección exterior; (ver figura4.10).

R_{int} = Radio de la sección interior; (ver figura4.10).

Por lo que:

$$I_A = \frac{\pi}{4} \cdot (R_{\text{ext}}^4 - R_{\text{int}}^4) = \frac{\pi}{4} (70^4 - 50^4) = 13948704 \text{ mm}^4$$

El momento flector máximo de la sección A es la longitud “L2” por lo que las tensiones máximas en la zona crítica de la sección A es la siguiente:

$$L1 = 160 \text{ mm}$$

$$L2 = 50 \text{ mm}$$

$$P = 100000 \text{ N}$$

$$M(X)_{\max A} = X = L_2 \Rightarrow P \cdot (L_1 - L_2) = 100000 \cdot (160 - 50) = 11000000 \text{ Nmm}$$



$$\sigma_{flectores_A} = \frac{M(x)_{\max A}}{I_A} \cdot \frac{y_A}{2} = \frac{11000000}{13948704} \cdot \frac{140}{2} = 55.20 MPa$$

Sección B:

$$I_B = \frac{\pi}{4} \cdot (R_{ext}^4 - R_{int}^4)$$

R_{ext} = Radio de la sección exterior; (ver figura4.12).

R_{int} = Radio de la sección interior; (ver figura4.10).

Por lo que:

$$I_B = \frac{\pi}{4} \cdot (R_{ext}^4 - R_{int}^4) = \frac{\pi}{4} (90^4 - 50^4) = 46621344 mm^4$$

El momento flector máximo de la sección B es la longitud “0” por lo que las tensiones máximas en la zona crítica de la sección 0 es la siguiente:

$$L_1 = 160 \text{ mm}$$

$$P = 100000 \text{ N}$$

$$M(X)_{\max B} = X = L_2 \Rightarrow P \cdot (L_1 - 0) = 100000 \cdot (160 - 0) = 16000000 Nmm$$

$$\sigma_{flectores_B} = \frac{M(x)_{\max B}}{I_B} \cdot \frac{y_B}{2} = \frac{16000000}{46621344} \cdot \frac{180}{2} = 30.88 MPa$$

Esfuerzos NORMALES.

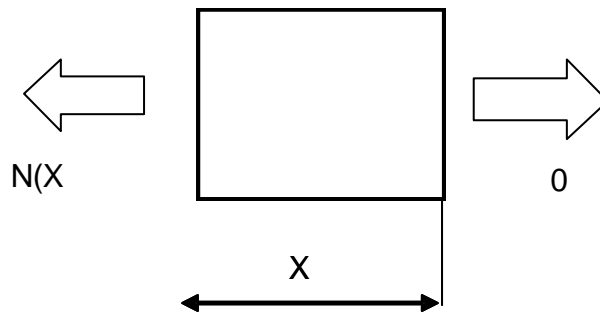


Figura 4. 39: Distribución esfuerzos tracción (GFEM).

Según el equilibrio de fuerzas, el esfuerzo vendrá definido de la siguiente manera:

$$N(X) = 0$$

La tensión proveniente del esfuerzo flector vendrá calculada por la siguiente formulación:

$$\sigma_{normales} = \frac{N(x)}{A}$$

Donde:

$N(x)$ = Fuerza normal distribuida a lo largo de la viga.

A = Área de la sección sobre la cual esta aplicada.

Como $N(x) = 0$ las tensiones tanto en la sección A y B van a ser nulas.

A estas tensiones se les tendría que añadir los K_t correspondientes para así mayorar las tensiones en las zonas críticas, pero para nuestro primer análisis no va hacer falta porque en este primer estudio no queremos conocer el nivel de tensiones para conocer el fallo de la pieza o evaluar la fatiga de este, nosotros lo que necesitamos conocer es la zona que más probabilidades tendría de fallar para seguir con el segundo análisis en el cual “si” evaluaremos el nivel de tensiones en nuestra zona crítica con el modelo detallado “DFEM”.

El nivel de tensiones en la sección A y B son las siguientes

$$\sigma_{TOTAL_A} = \sigma_{flectores_A} + \sigma_{normales_A} = 55.20 + 0 = 55.20 MPa$$

$$\sigma_{TOTAL_B} = \sigma_{flectores_B} + \sigma_{normales_B} = 30.88 + 0 = 30.88 MPa$$

Después de evaluar las tensiones en las diferentes zonas hemos llegado a la conclusión de que la zona crítica será la sección A, y la zona crítica dentro de esta se localizará en el cambio de sección entre la zona A y la zona B, se puede ver en la siguiente figura:

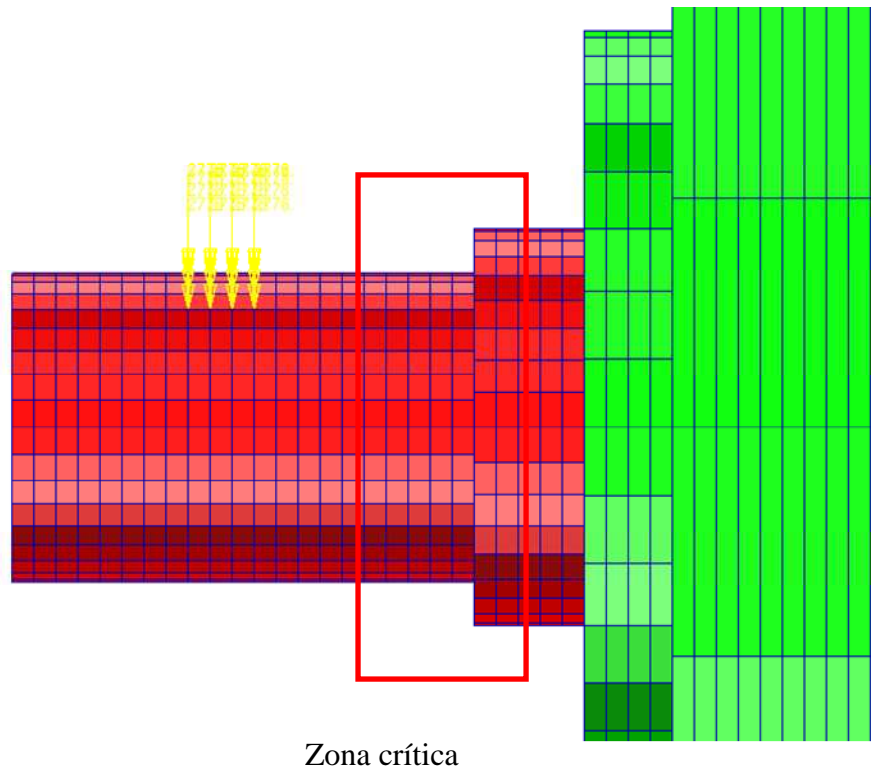


Figura 4. 40: Zona crítica del modelo global (GFEM).

Podemos observar el nivel de tensiones que aparecen en la superficie de nuestra pieza es muy inferior al límite de fluencia de nuestro material, por lo que el **Factor de Reserva** es de:

$$RF = \frac{F_y}{\sigma_{TOTAL_A}} = \frac{1000MPa}{55.2MPa} = 18.11$$

Donde:

RF = Factor de Reserva

F_y = Límite a fluencia del material de la pieza (MPa).

σ_{TOTAL_A} = Tensión máxima en la superficie de la zona crítica "A" (MPa).

Con la zona localizada se pasará al segundo punto del análisis, aislaremos la zona crítica y remallaremos ésta para obtener un modelo detallado con el cual podremos extraer la información que necesitamos para evaluar el crecimiento de las tensiones en función del crecimiento de grieta.

4.2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO DETALLADO (DFEM).

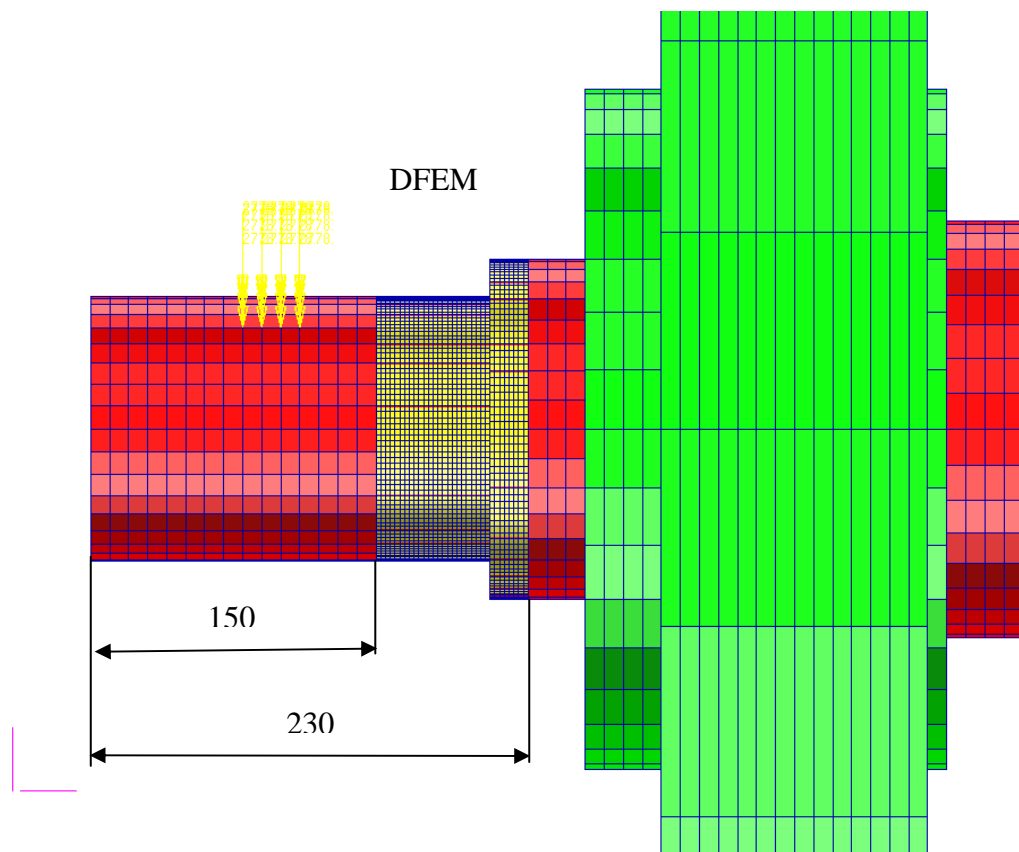
Como se ha explicado en apartados anteriores, el objetivo de desarrollar un segundo modelo es por la limitación de cálculo de estos programas.

Después de localizar la zona crítica de nuestro eje, vamos a aislarla y remallar con un tamaño de elemento lo suficientemente pequeño como para obtener resultados representativos que reproduzcan lo que esta ocurriendo en la realidad, y al mismo tiempo que tengamos un número de elementos y de nodos razonables para que el programa sea capaz de obtener resultados en un tiempo óptimo.

4.2.1. DESCRIPCIÓN MODELO FEM.

El mallado del modelo detallado se va a realizar con elementos sólido (HEX8), con un tamaño de elemento de 2.5 mm x 2.5 mm x 2.5 mm (ver figura 4.43), la estructura del modelo consta de una única pieza, este modelo partirá del modelo GFEM, aislaremos los elementos de la zona crítica que anteriormente hemos seleccionado, (ver la figura 4.40).

La zona crítica, donde aparecerán la mayor concentración de tensiones, es la zona de cambio de sección, ente la secciones A-A' y C-C' (ver figura 4.11).



Todas las cotas están “mm”

Figura 4. 41: Remallado zona crítica (DFEM).

Se ha cogido una longitud lo suficientemente extensa para desarrollar un análisis de la zona crítica sin que las condiciones de contorno (ver capítulo 4.1.6) influyan en los resultados (ver figura 4.41).

Después de aislar los elementos, en el modelo global (GFEM) identificaremos los nodos de los extremos (ver figuras 4.48 y 4.49), de los cuales obtendremos las cargas y las condiciones de contorno para analizar nuestro nuevo modelo (DFEM).

A partir de estos nodos remallaremos nuestro modelo detallado con elementos de dimensiones $(2.5 \times 2.5 \times 2.5)$ como se ha explicado al principio del capítulo 4. Hay que decir que en los extremos de este nuevo modelo va a haber más nodos que en el modelo GFEM (ver figuras 4.51 y 4.52), pero lo importante es como se ha partido de los nodos del GFEM nos hemos asegurado que coincidan los nodos del DFEM con los GFEM. Así de esta manera podremos traspasar los desplazamientos de los nodos del GFEM a los nodos DFEM representando el comportamiento del modelo real al detallado pudiendo sacar resultados más exactos.

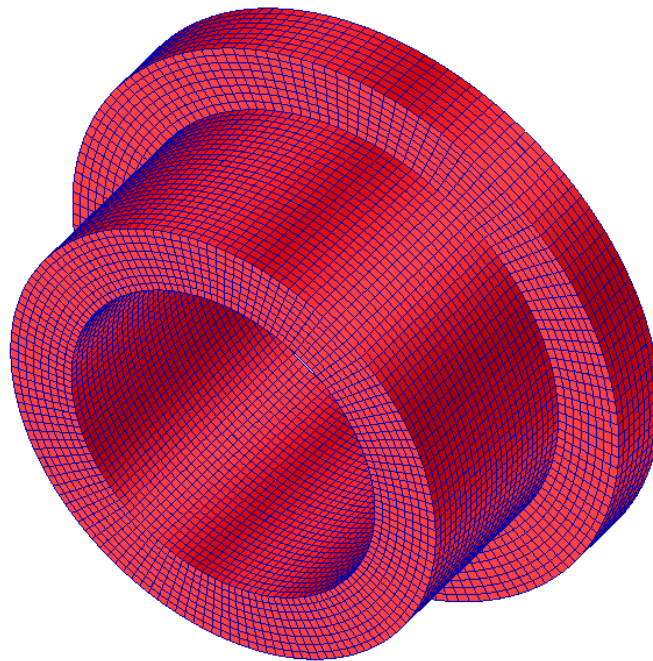


Figura 4. 42: FEM modelo detallado (DFEM).

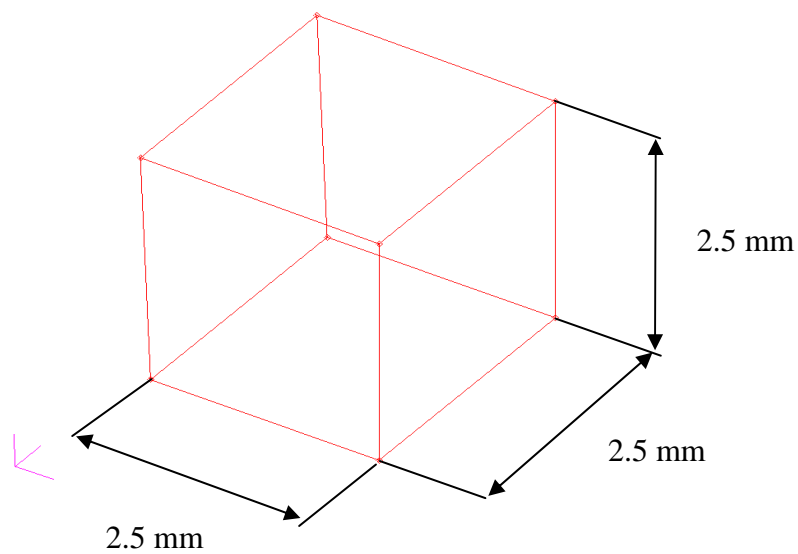


Figura 4. 43: Dimensiones elemento sólido HEXA8, modelo detallado (DFEM).

4.2.2. SISTEMA DE COORDENADAS.

Como en el modelo global (GFEM) el sistema de coordenadas utilizado es el “8701” ya que el modelo local (DFEM) parte del modelo global.

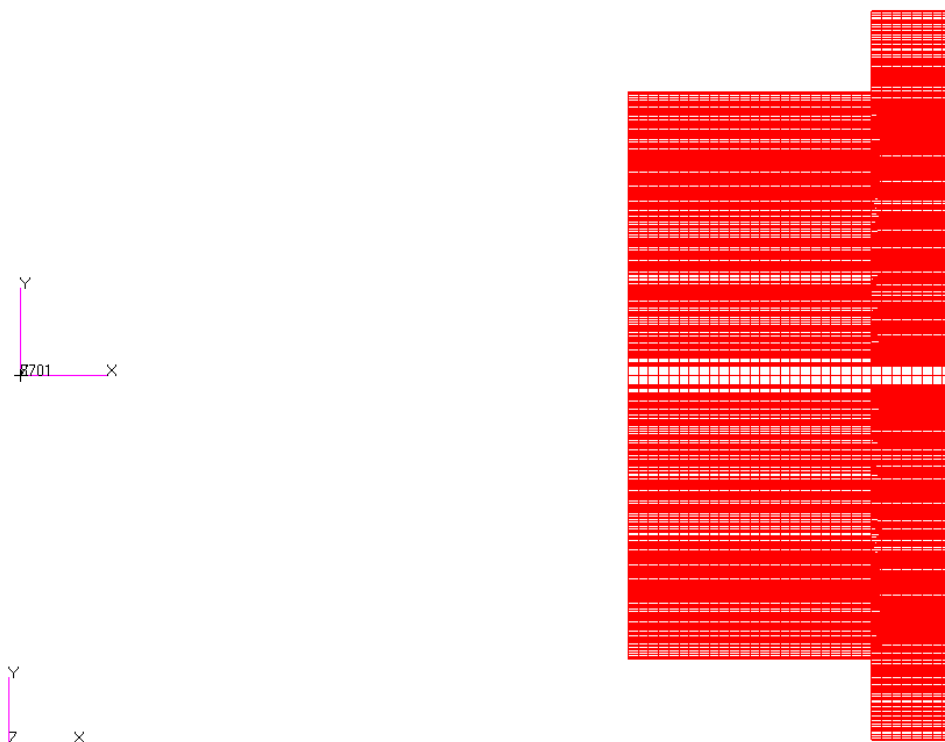


Figura 4. 44: Sistema de coordenadas “8701” (DFEM).

4.2.3. DIMENSIONADO MODELO FEM.

La geometría del modelo DFEM se puede ver en la siguiente figura:

Todas las cotas están “mm”

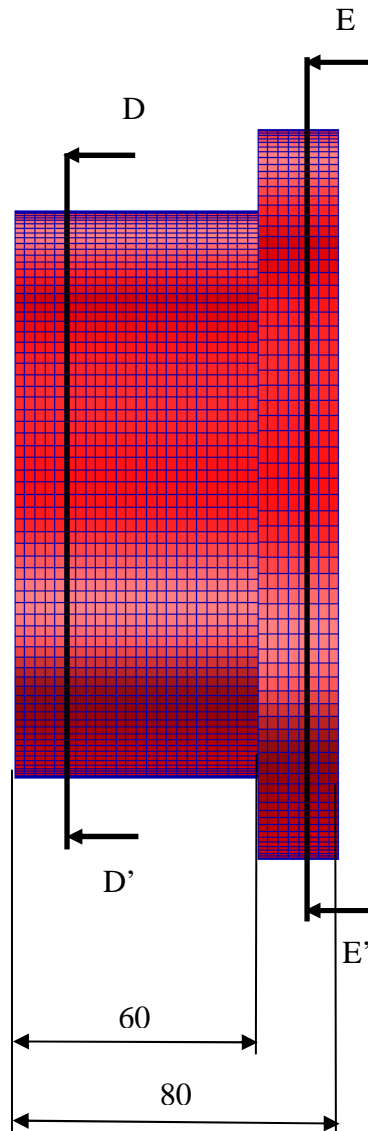


Figura 4. 45: Dimensiones zona detallada (DFEM).

Sección D-D':

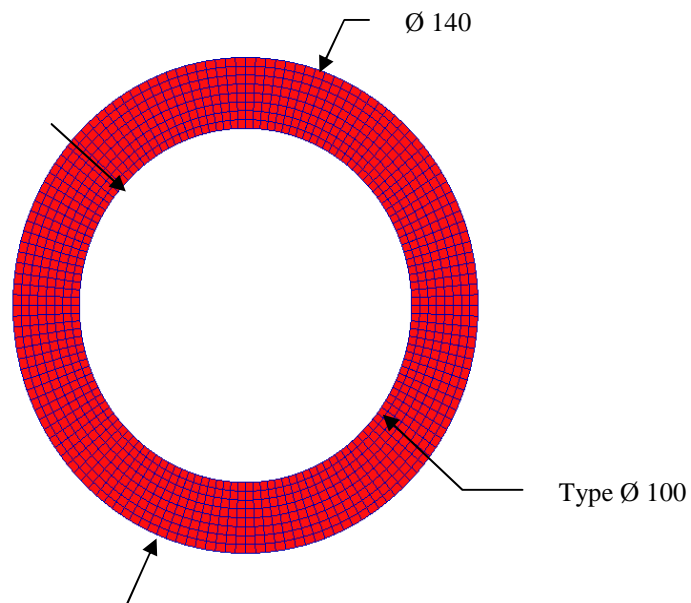


Figura 4. 46: Dimensiones zona detallada sección D-D' (DFEM).

Sección E-E':

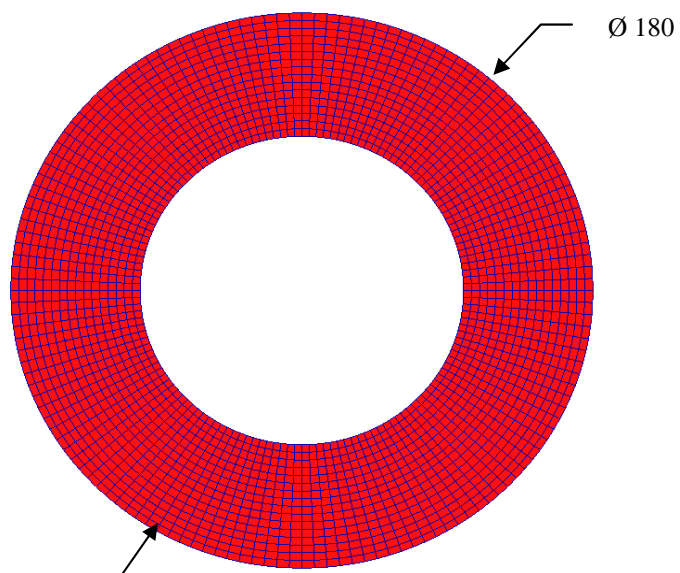


Figura 4. 47: Dimensiones zona detallada sección E-E' (DFEM).



4.2.4. CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DETALLADO (DFEM).

A continuación se mostraran un resumen del modelo detallado, en el que detalla las características generales del modelo. Este resumen se encuentra en el fichero de texto *.f06.

M O D E L S U M M A R Y

NUMBER OF GRID POINTS = 53136

NUMBER OF CHEXA ELEMENTS = 46080

4.2.5. CARGAS EXTERNAS Y CONDICIONES DE CONTORNO.

En este caso las condiciones de contorno y las cargas a las que va a estar sometido nuestro modelo detallado (DFEM) van a ser implantadas a través de “SPCD” a lo que llamamos desplazamientos forzados.

Los desplazamientos forzados se utilizan para trasladar los desplazamientos de una zona identificada de un modelo a otro modelo para reproducir el estado de carga del primer modelo al segundo, como es nuestro caso.

Estos desplazamientos son reproducidos en los nodos del modelo detallado, que coinciden en coordenadas inicialmente con las del modelo original (GFEM).

Las cargas externas son aplicadas como desplazamientos de los nodos. Estos desplazamientos provocan tensiones en el modelo, que son las mismas que se producen en el GFEM en la zona limitada por estos nodos. Gracias a esto somos capaces de reproducir el estado de carga en otro modelo externo con las misma geometría y propiedades que el hermano mayor pero a favor que podemos desarrollar un análisis de esta zona en particular con más exactitud.

Los nodos que se han seleccionado en el GFEM para generar las **SPCD** como es evidente serán los nodos de los extremos, como se puede ver en la siguiente figura:

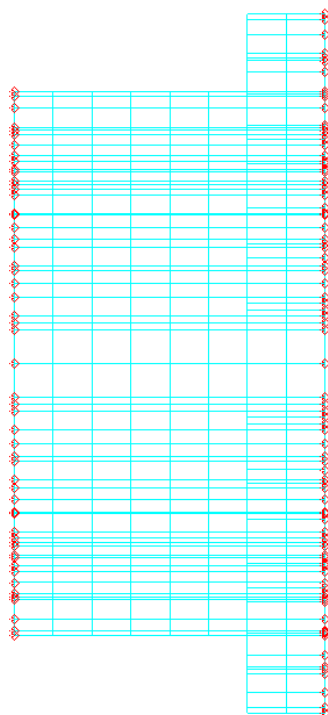


Figura 4. 48: Nodos SPCD lado GFEM (1).

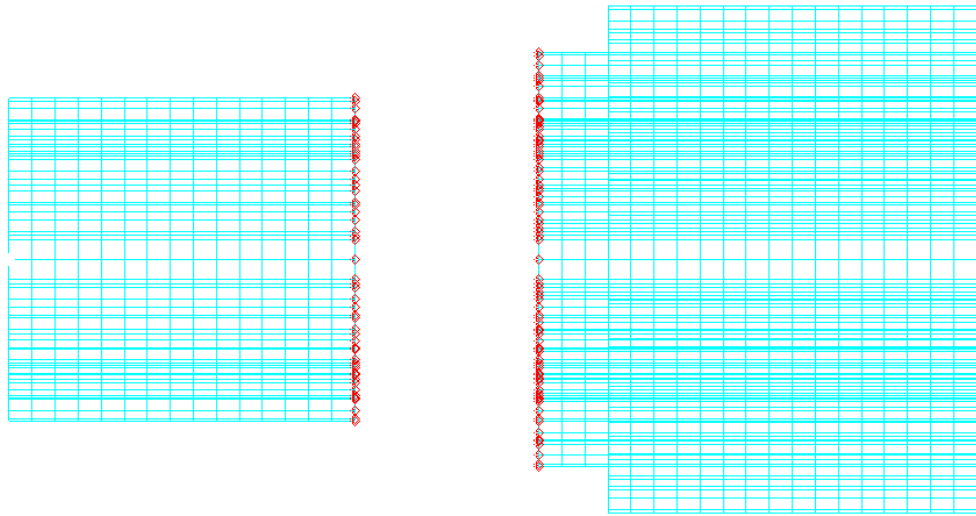


Figura 4. 49: Nodos SPCD lado GFEM (2).

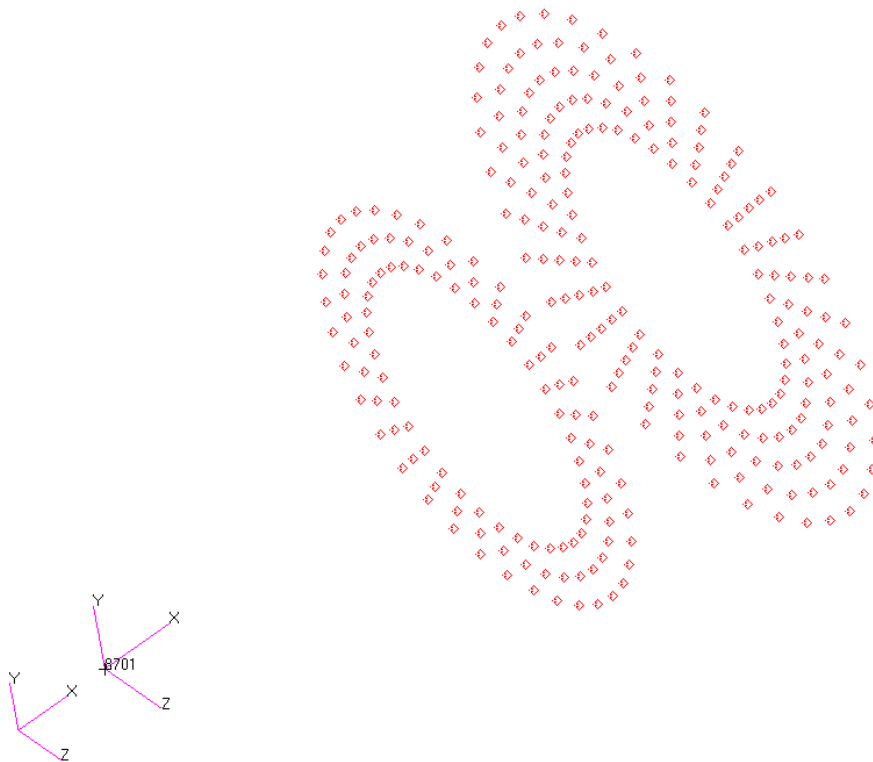


Figura 4. 50: Nodos SPCD lado GFEM (3).

Los nodos del GFEM serán la entrada de carga, ya que se les está aplicando un desplazamiento forzado que restringe el movimiento del modelo, deformándolo y generando una distribución de tensiones internas en el mismo.

Los desplazamientos de nodos utilizados del GFEM para crear las SPCD se pueden ver en el anexo IV.

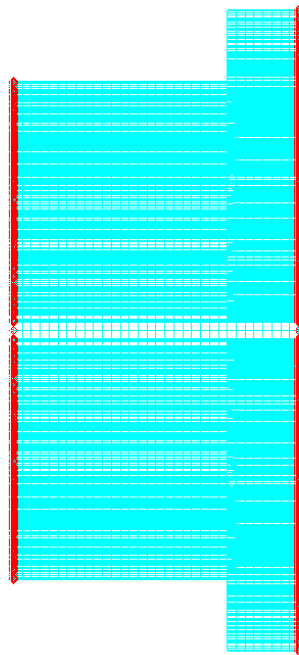


Figura 4. 51: Nodos SPCD lado DFEM (1).

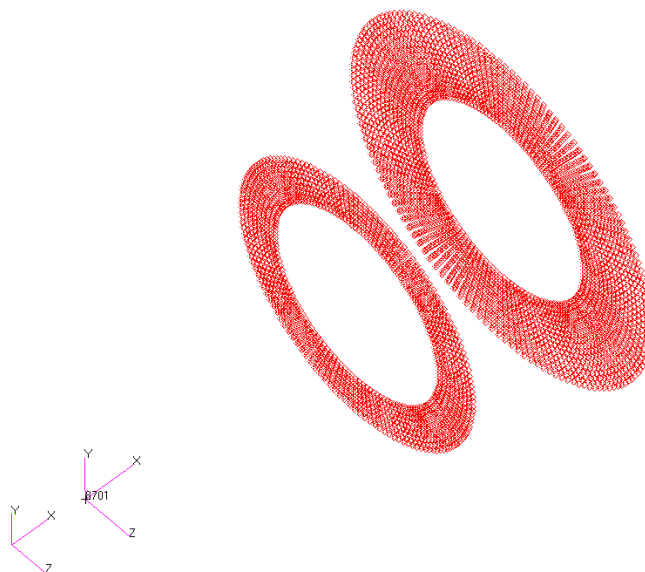


Figura 4. 52: Nodos SPCD lado DFEM (2).

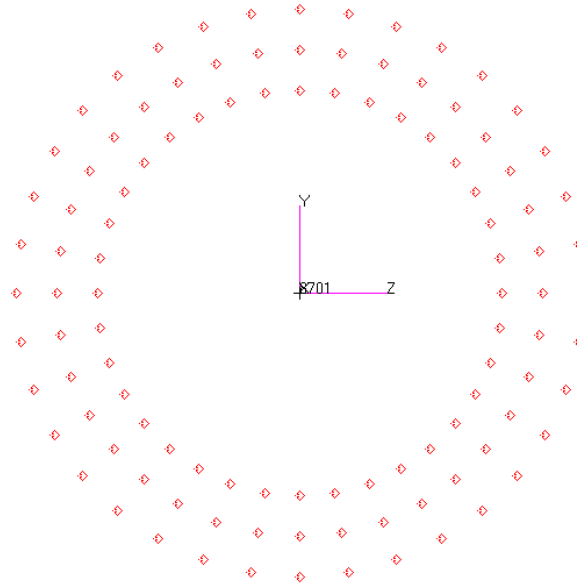


Figura 4. 53: Distribución de los nodos SPCD sección D-D' (1).

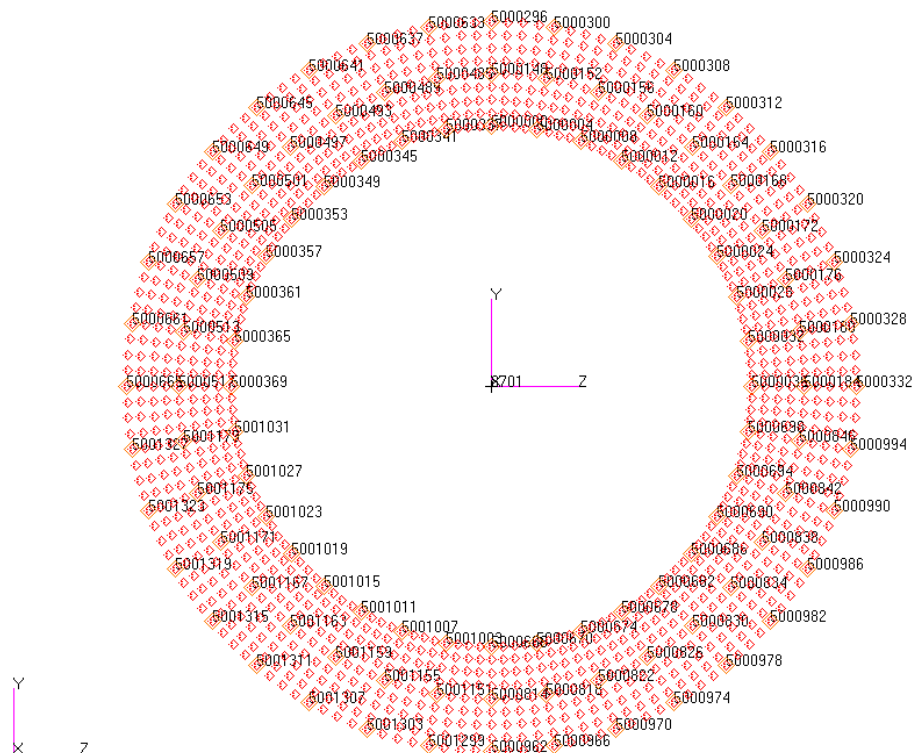


Figura 4. 54: Distribución de los nodos SPCD sección D-D' (2).

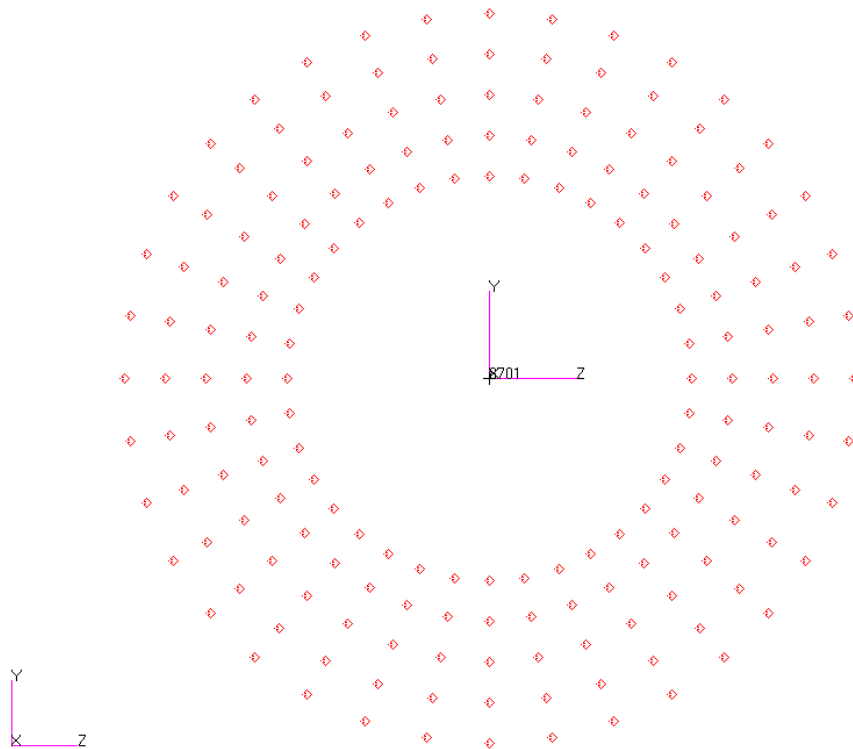


Figura 4. 55: Distribución de los nodos SPCD sección E-E' (1).

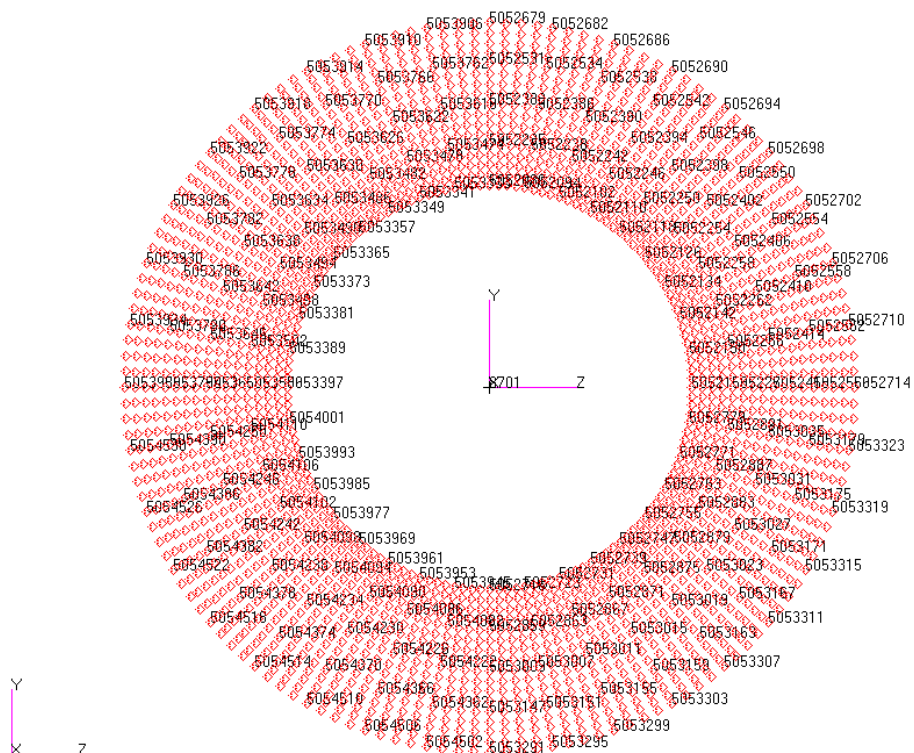


Figura 4. 56: Distribución de los nodos SPCD sección E-E' (2).



Todas estas coordenadas provienen del sistema de salida (análisis) de los nodos implicados. El sistema de análisis de los nodos tanto del modelo global como del detallado es el sistema “8701”.

Desplazamientos forzados

Obtenidos los desplazamientos de los nodos comunes para el modelo detallado y para el modelo global se generan las **SPCD**.

Las SPCD van a forzar que el nodo del modelo detallado se desplace lo mismo que se ha desplazado su nodo común en el modelo global. De esta manera podremos reproducir las tensiones internas que sufre la zona seleccionada.

Estas deformaciones vienen referenciadas al sistema de coordenadas 8701. Estos desplazamientos se introducen en el modelo y son ejecutadas con NASTRAN, ver capítulo 2.2.2.

A continuación se mostrara una tarjeta para ver su composición, El resto de tarjetas que modelan las SPCD se pueden ver en el anexo V. de las siguientes tarjetas:

Tabla 4. 1: Tarjetas NASTRAN para las SPCD (DFEM).

Tipo tarjeta	SID	Gi	Ci	Di
SPCD	300	5000666	1	0.035

Los desplazamientos forzados se representan en el modelo detallado de la siguiente forma:

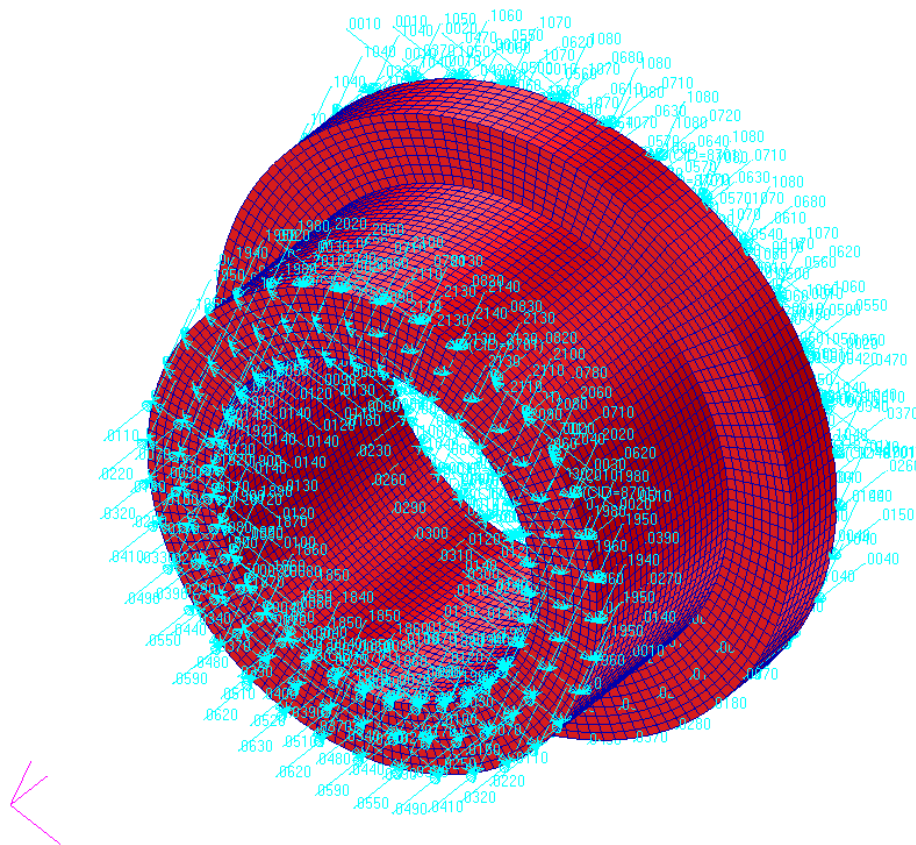


Figura 4. 57: Vectores deformación SPCD.

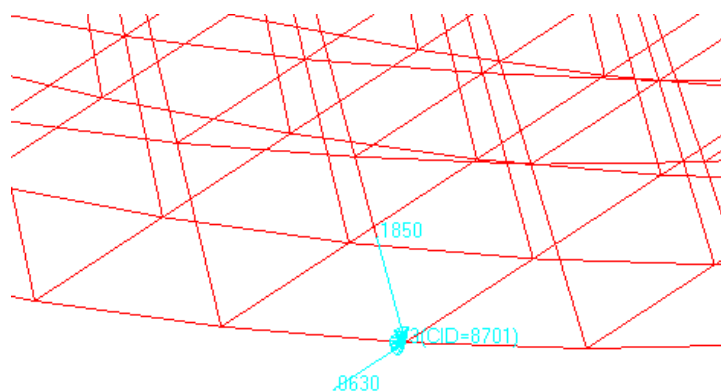


Figura 4. 58: Vectores deformación SPCD (detalle).

Restricciones del movimiento.

Después de aplicar los desplazamientos de los nodos, hay que restringir su movimiento en el espacio, ya que la SPCD desplaza el nodo a una posición nueva, pero este se queda suelto, por lo que hay que aplicar una restricción a cada nodo implicado en el desplazamiento forzado.

Las condiciones de contorno del modelo detallado (DFEM) tienen que ser impuestas a través de los nodos comunes, que son la unión y la representación del resto del sistema.

A cada nodo del modelo detallado se le restringirá su movimiento en los tres grados de libertad transnacionales (X; Y; Z).

Nastran lee primero la **SPCD**, desplazando el nodo registrado en la tarjeta a la posición marcada en el sistema de análisis del nodo (sistema coordenadas 8701). Después de aplicar este desplazamiento aplica la tarjeta **SPC1** donde estos nodos se le aplicará la restricción de los grados de libertad indicada en la tarjeta **NASTRAN** (ver capítulo 2.2.2), anclando el modelo **hiperestáticamente** pudiendo resolver el problema lineal planteado y resolver las matrices y obtener los resultados preseleccionados.

La estructura de las SPC1 se podrá ver en la tabla 4.2. Las restricciones se representarán en el modelo de la siguiente forma:

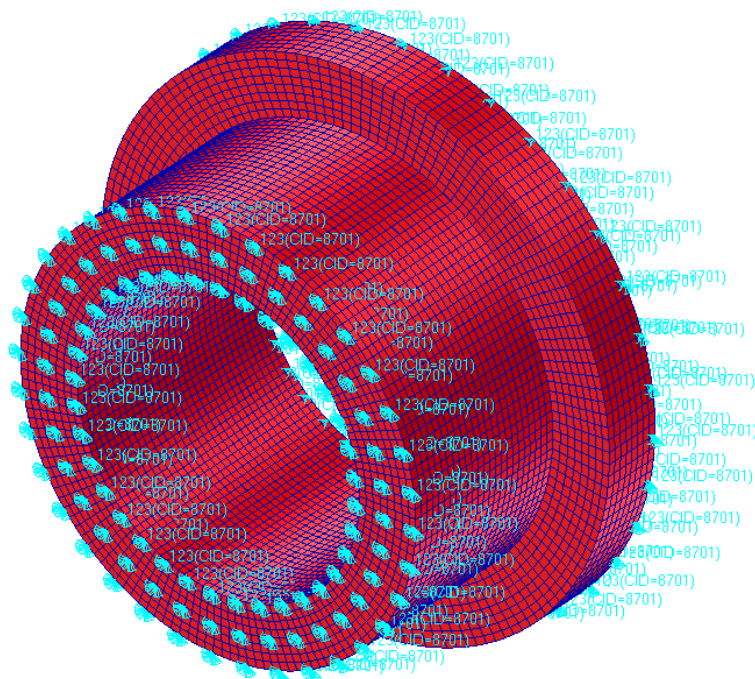


Figura 4. 59: Restricciones movimiento modelo detallado sección A-A' (DFEM).

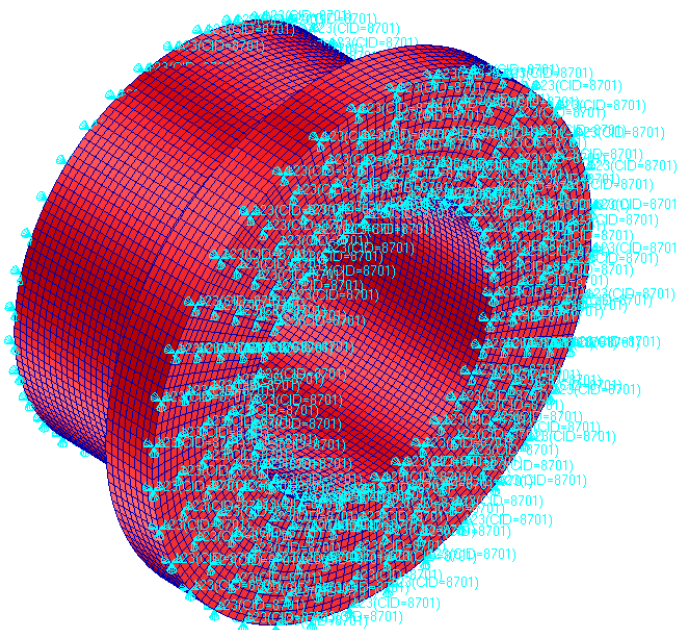


Figura 4. 60: Restricciones movimiento modelo detallado sección B-B' (DFEM).

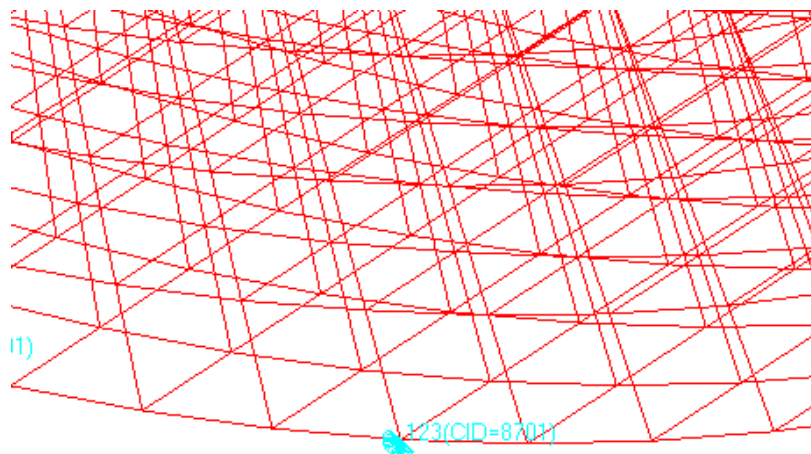


Figura 4. 61: Restricciones movimiento modelo detallado (DFEM) (detalle).

Ejemplo de uno de los SPC1 del modelo.

Tabla 4. 2: Tarjeta NASTRAN SPC1 para el modelo detallado (DFEM).

Tipo tarjeta	SID	C	Gi
SPC1	654321	123	5000666

No se muestra la lista entera porque sino se convertiría en un documento eterno. El fichero de programación completo se puede ver en el anexo VI.



4.2.6. PROCESO DE ANÁLISIS DEL MODELO DETALLADO.

Desarrollado el modelo detallado pasaremos a la segunda parte del análisis del componente. Vamos a proceder a realizar un análisis más detallado de la zona que representa el modelo DFEM.

Con el modelo detallado vamos a poder estudiar el comportamiento del componente ante la aparición de pequeños defectos en su superficie (aproximadamente en un rango 5 mm de largo y 2.5 mm de profundidad).

Visualizaremos los siguientes resultados:

- Distribución de tensiones: se van a medir la distribución de tensiones en la grieta en función del tamaño de la fisura.
- Medición desplazamientos: se va a comparar las deformaciones en la superficie de la grieta con las de la base la fisura y como evolucionan en función del tamaño de la grieta.
- Modos propios de la estructura: se van a calcular los 5 primeros modos propios de cada modelo para evaluar cambios en las frecuencias en función del tamaño de las grietas que aparezcan en la superficie.

Para poder desarrollar un análisis modal en NASTRAN deberemos cambiar de solución. Para el cálculo de deformación y de tensiones hemos utilizado una solución lineal “101”, ver anexos I, II, para el análisis modal utilizaremos una solución “103” (ver capítulo 2.2.4) y anexo III.

Importante para ejecutar un análisis modal, es tener la densidad del material incluida en tu tarjeta de materiales (ver capítulo 3.2), en unidades de T/mm^3 , (ver capítulo 2.1).

Análisis que **no** podríamos realizar si intentáremos hacerlo directamente con el modelo global, ya que su tamaño de elemento no nos dejaría desarrollar un análisis tan detallado de una fisura tan pequeña que podría aparecer por:

- Sobrecarga aplicada sobre la estructura.
- Defecto interno al generar la forja.
- etc....

Estos defectos generan micro deformaciones que podrían, si no se prevén, convertirse en problemas más serios como en el fallo completo de la estructura.

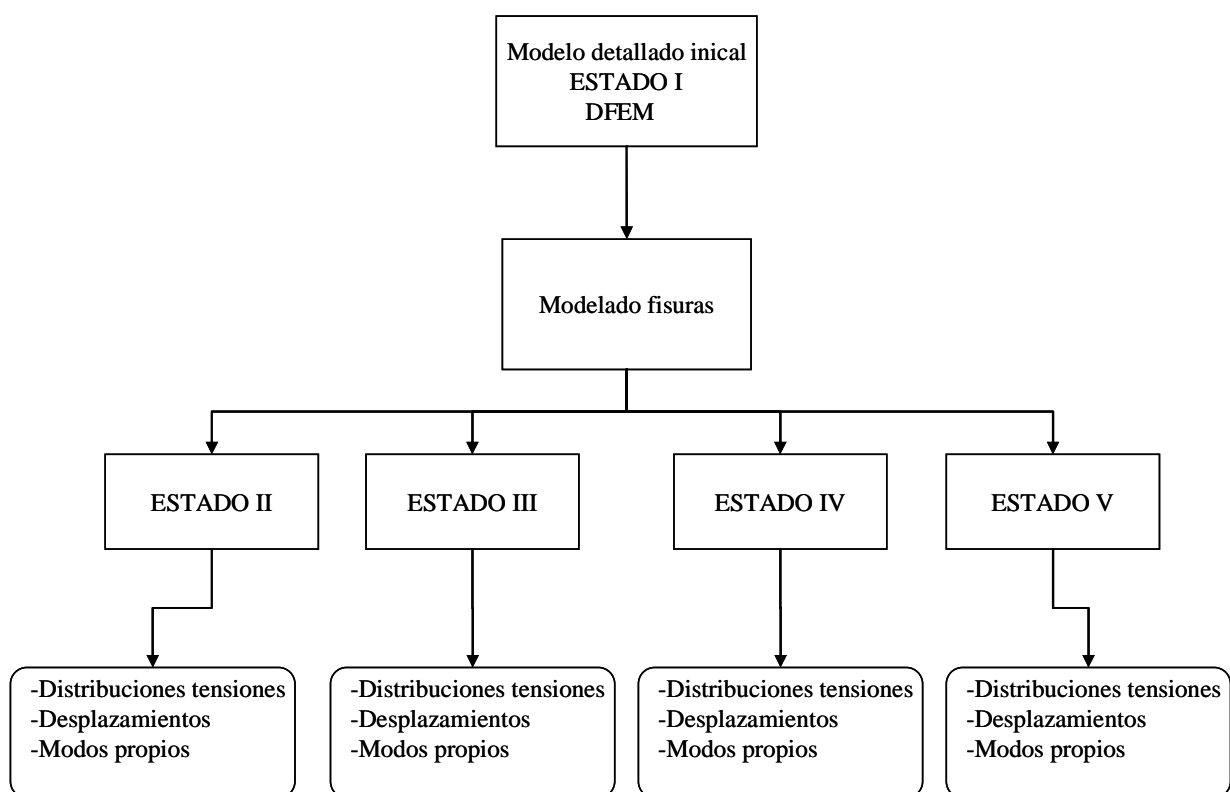
Procedimiento del análisis

El análisis va a consistir en modelar unas pequeñas grietas que simularan el crecimiento de esta penetrando dentro de la sección. Estas grietas se van a localizar en la zona crítica del modelo, que explicaremos mas adelante.

El objetivo del análisis consiste en ver la evolución de los puntos anteriores en función del crecimiento de una grieta en la superficie del componente, gracias al programa NASTRAN.

De esta manera, una aplicación para este estudio sería por ejemplo, tras localizar un defecto en la superficie del componente en un estado de carga similar al expuesto en la memoria, podríamos conocer la distribución de tensiones de la zona afectada, midiendo la profundidad de la entalla, podemos evaluar el procedimiento de seguridad a seguir por el personal de mantenimiento.

A continuación se mostrara un organigrama que resumirá el proceso de análisis.



Se va a estudiar el componente en 5 estados diferentes:

Estado I: Análisis del modelo inicial sin ningún defecto en la superficie

Estado II: Análisis del componente del estado I con la aparición de un defecto en la superficie con una profundidad de 2.5 mm.

Estado III: Análisis del modelo del estado II con un aumento de la profundidad del defecto en la superficie de 2.5 mm, total 5 mm.

Estado IV: Análisis del modelo del estado III con un aumento de la profundidad del defecto en la superficie de 2.5 mm, total 7.5 mm.

Estado V: Análisis del modelo del estado IV con un aumento de la profundidad del defecto en la superficie de 2.5 mm, total 10 mm.

4.2.7. ANÁLISIS MODELO DETALLADO, ESTADO I.

Vamos a sacar resultados de una rebanada (sección) del componente con un espesor de **2.5 mm**. Esta rebanada va estar localizada a una distancia de **15 mm** de la zona crítica.

Recordamos que la zona crítica estaba localizada en la zona de cambio de sección. El estudio se va a desarrollar a 15 mm de la zona de cambio de sección para evitar las concentraciones de tensiones que aparecen en esta zona en el modelo FEM. Además en el modelo real aparece un radio de acuerdo en este cambio de sección, nosotros no somos capaces de representar esos pequeños detalles en el modelo FEM por lo que obtendremos resultados más fiables analizando a esta distancia.

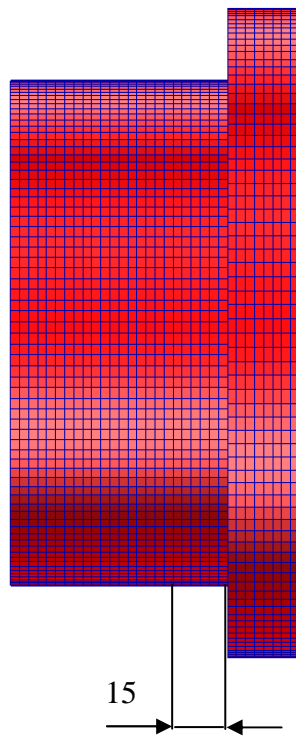
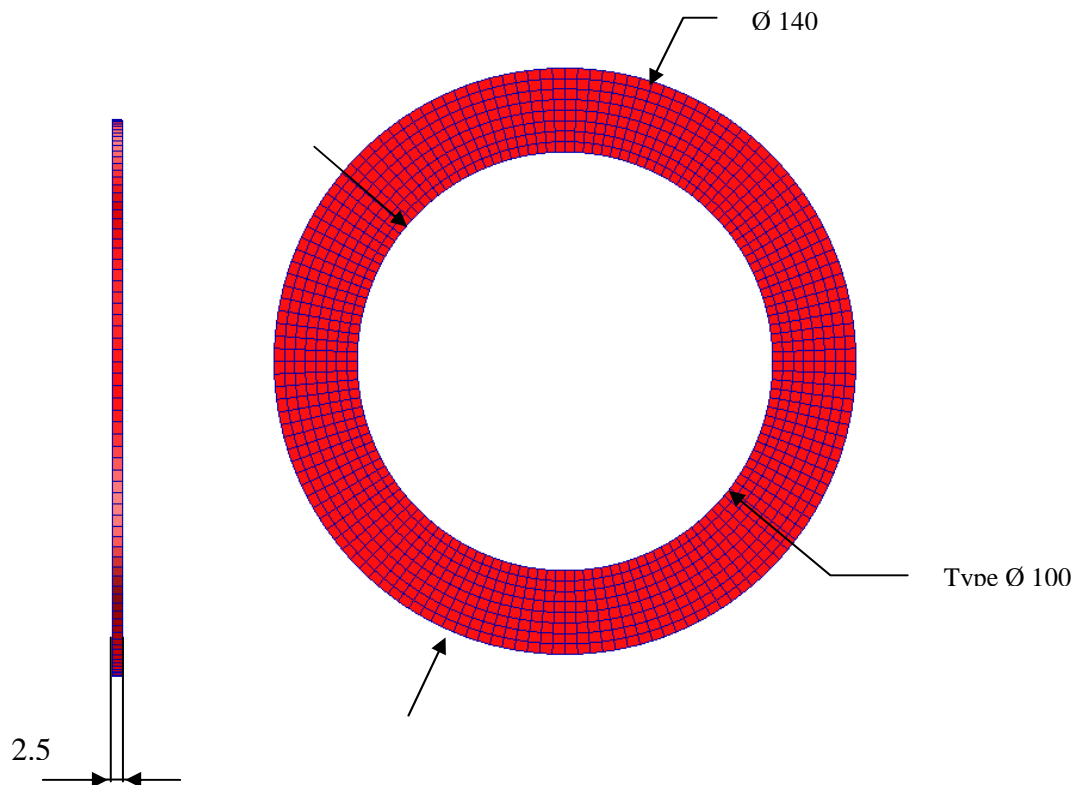


Figura 4. 62: Distancia zona análisis (DFEM).



Todas las cotas están “mm”

Figura 4. 63: Dimensiones sección de análisis (DFEM).

4.2.7.1 DEFORMACIÓN.

Los resultados obtenidos en el estado I los vamos a comparar con los resultados que provienen del modelo GFEM, así también nos sirve como chequeo del modelo DFEM.

Lo primero que vamos a analizar es la deformada del modelo, el máximo desplazamiento en el modelo DFEM debe coincidir con el máximo desplazamiento en la misma zona en el modelo GFEM.

En este caso no se puede sacar resultados del defecto ya que este modelo no tiene modelada ninguna fisura en la superficie.

MSC.Patran 2005 07-Dec-11 18:55:13

Deform: ESTATICO_CAS01, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)

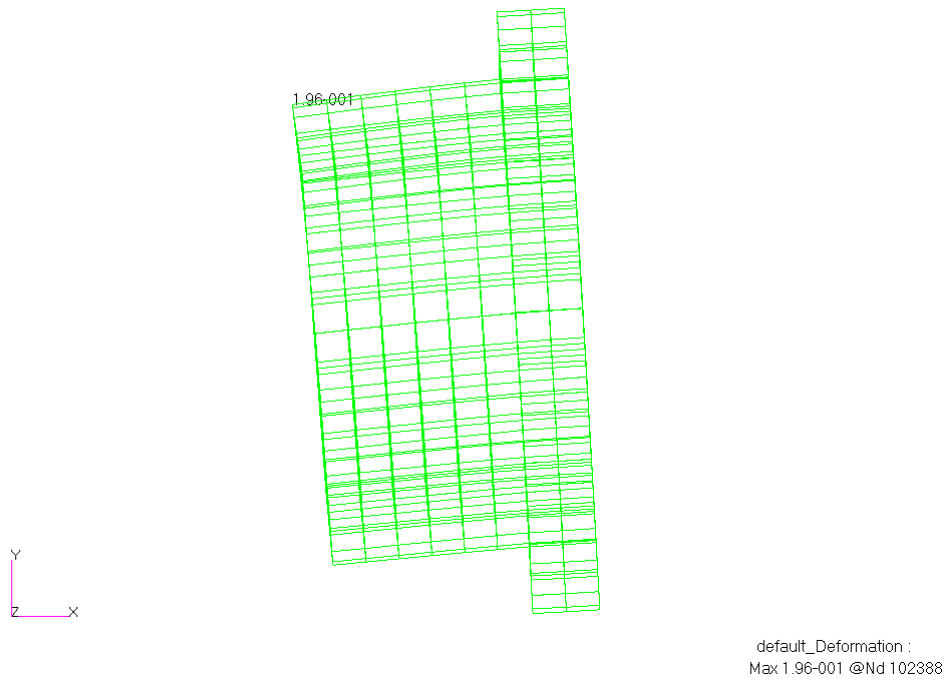


Figura 4. 64: Deformada zona crítica modelo global (GFEM).

MSC.Patran 2005 07-Dec-11 18:57:10

Deform: ESTATICO_CAS01, Static Subcase, Displacements, Translational, (NON-LAYERED)

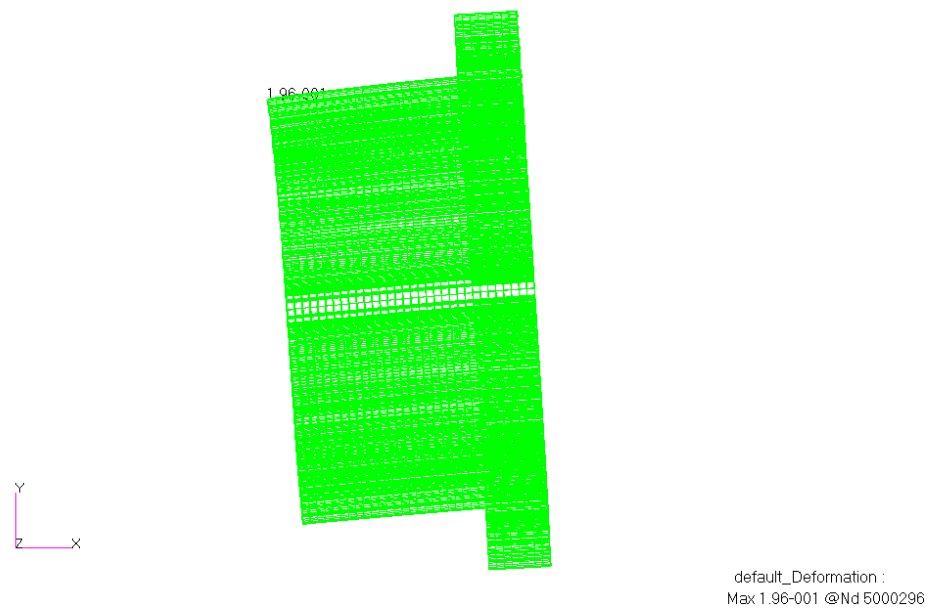


Figura 4. 65: Deformada zona crítica modelo detallado (DFEM).

Se puede observar en las figuras anteriores que la deformación del modelo DFEM es idéntica a la de los elementos que representaría nuestro modelo detallado en el modelo GFEM.

Mostraremos a continuación la deformada de la sección del modelo que va a ser analizada y donde se van a estudiar las fisuras en los siguientes modelos.

NOTA:

En los Plot de las deformadas de nuestros modelos se van a representar de la siguiente manera:

- Plot azul es el modelo sin deformar.
- Plot rojo es el modelo deformado.

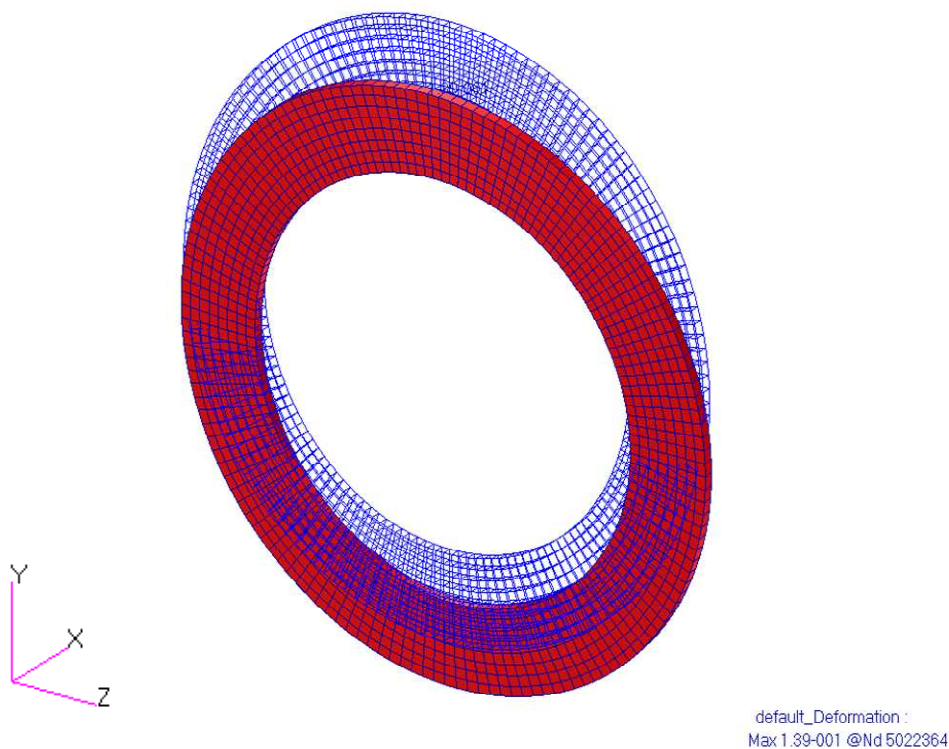


Figura 4. 66: Deformada sección crítica estado I, modelo detallado (DFEM).

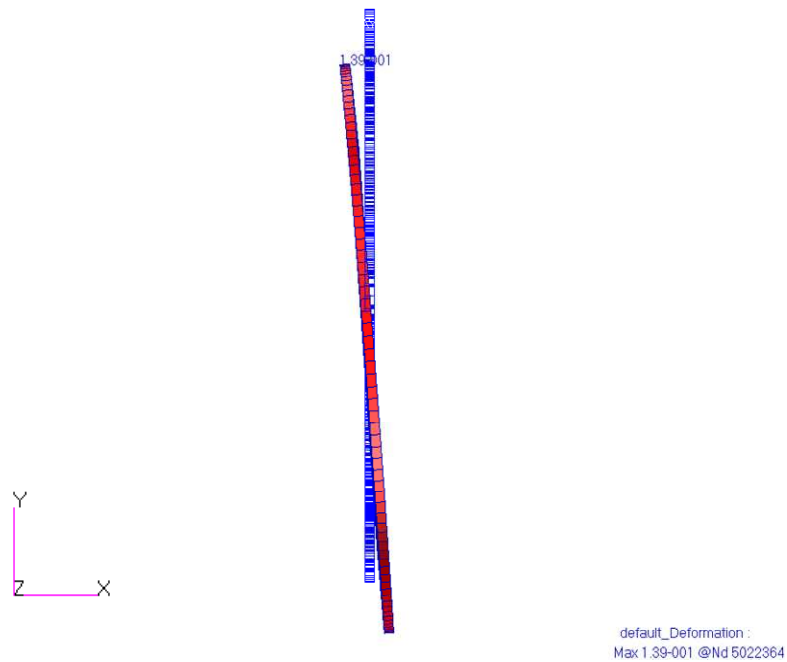


Figura 4. 67: Deformada sección crítica estado I, modelo detallado (DFEM).

La deformación máxima de la sección a estudiar es de **0.139 mm** y se encuentra en la superficie de la sección.

4.2.7.2 TENSIONES.

El nivel de tensiones del modelo global lo sacamos analíticamente aplicando la teoría básica de cálculo de estructuras. Haremos lo mismo pero aplicaremos unos nuevos datos para nuestras variables. El momento máximo que utilizaremos es el correspondiente a la zona de análisis, es decir $X = 65$ mm.

El momento flector máximo de la sección A es la longitud “L2” por lo que las tensiones máximas en la zona crítica de la sección A es la siguiente:

$$L1 = 160 \text{ mm}$$
$$P = 100000 \text{ N}$$

$$M(X)_{\max} = X = 65 \Rightarrow P \cdot (L_1 - X) = 100000 \cdot (160 - 65) = 9500000 \text{ Nmm}$$

$$I_A = \frac{\pi}{4} \cdot (R_{\text{ext}}^4 - R_{\text{int}}^4) = \frac{\pi}{4} (70^4 - 50^4) = 13948704 \text{ mm}^4$$

$$\sigma = \frac{M(x)_{\max A}}{I_A} \cdot \frac{y_A}{2} = \frac{9500000}{13948704} \cdot \frac{140}{2} = 47.7 \text{ MPa}$$

Como en este caso los esfuerzos normales siguen siendo nulos, se puede deducir a través de la siguiente ecuación el nivel de tensiones que soporta la rebanada del modelo detallado.

$$\sigma_{\text{TOTAL}} = \sigma_{\text{flectores}} + \sigma_{\text{normales}_A} = 47.7 + 0 = 47.7 \text{ MPa}$$

En la sección del modelo DFEM analizada se encuentra el siguiente nivel de tensiones de **von mises**:

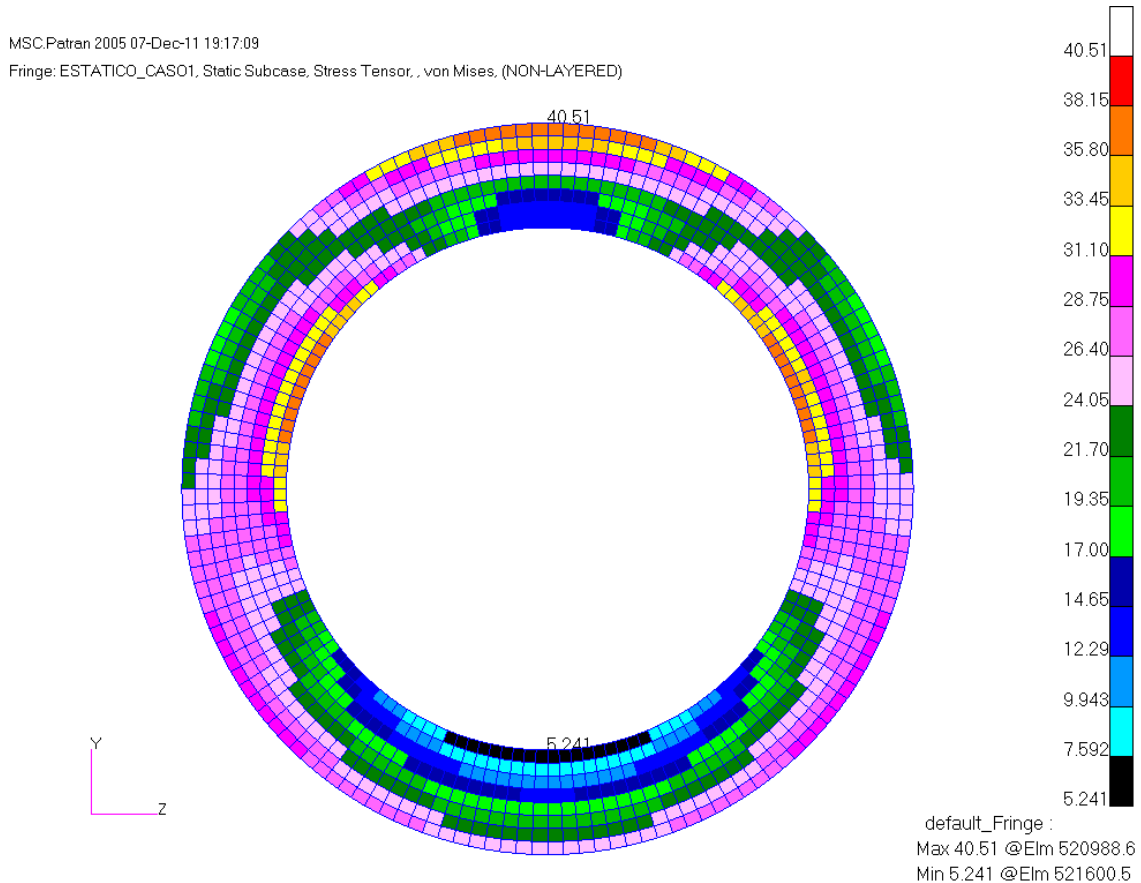


Figura 4. 68: Mapa de tensiones distribuidas sección crítica estado I (DFEM).

La tensión máxima que muestra el Plot de PATRAN está medida en la superficie exterior del elemento.

La tensión máxima es de **40.51 MPa** en el modelo. El análisis analítico del modelo global nos daba un resultado de **47.7 MPa**. El cálculo a través de elementos finitos es mucho más preciso que el analítico pero nos muestra que responden en el orden de magnitud, por lo que es una medida coherente.

Analizamos la evolución del **Factor de Reserva**:

$$RF = \frac{F_y}{\sigma_{ESTADO_I}} = \frac{1000MPa}{40.51MPa} = 24.7$$

4.2.7.3 MODOS PROPIOS.

Del estado I se han obtenido las siguientes frecuencias propias y sus respectivos modos propios:

Tabla 4. 3: Frecuencias propias para el estado I (DFEM).

MODE	CYCLES (Hz)
1	1.15E+04
2	1.15E+04
3	1.16E+04
4	1.16E+04
5	1.41E+04

A continuación se mostraran los Plot de los modos propios que aparecen en la tabla 4.3:

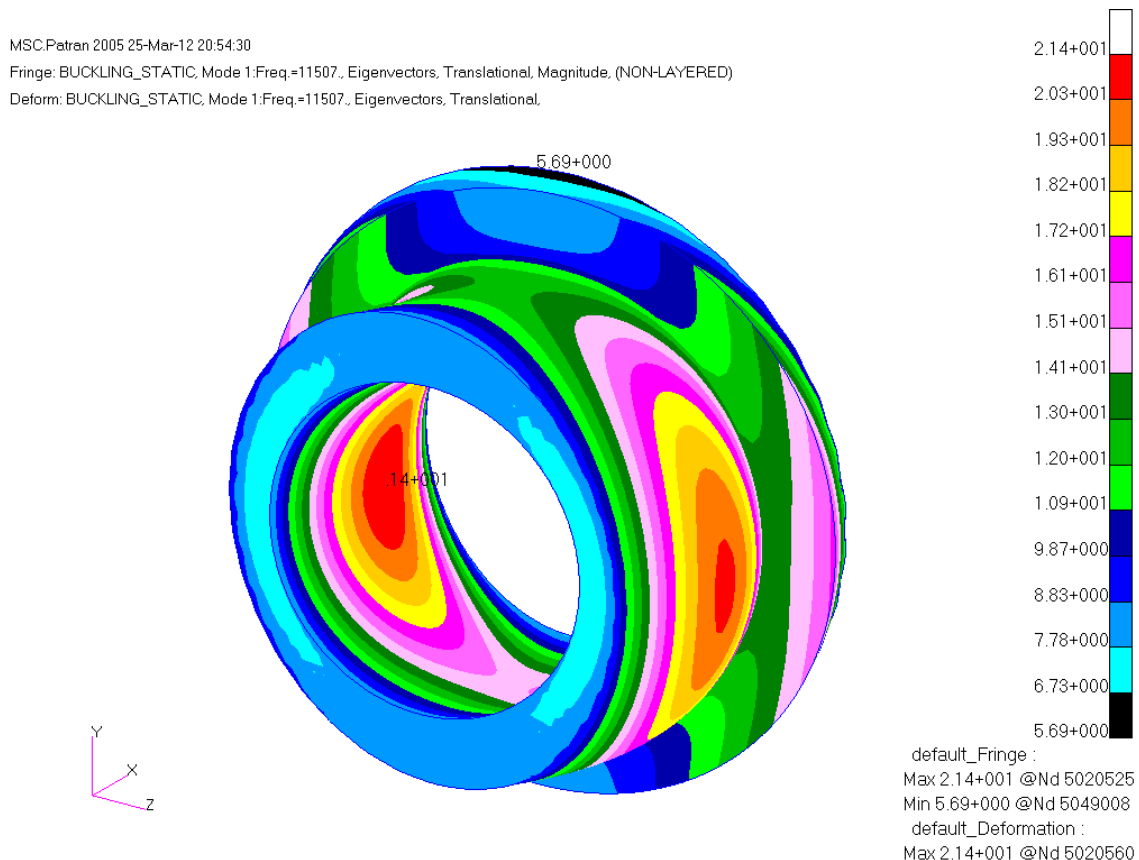


Figura 4. 69: Modo propio 1, estado I (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 20:55:56

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 2:Freq.=11507., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 2:Freq.=11507., Eigenvectors, Translational,

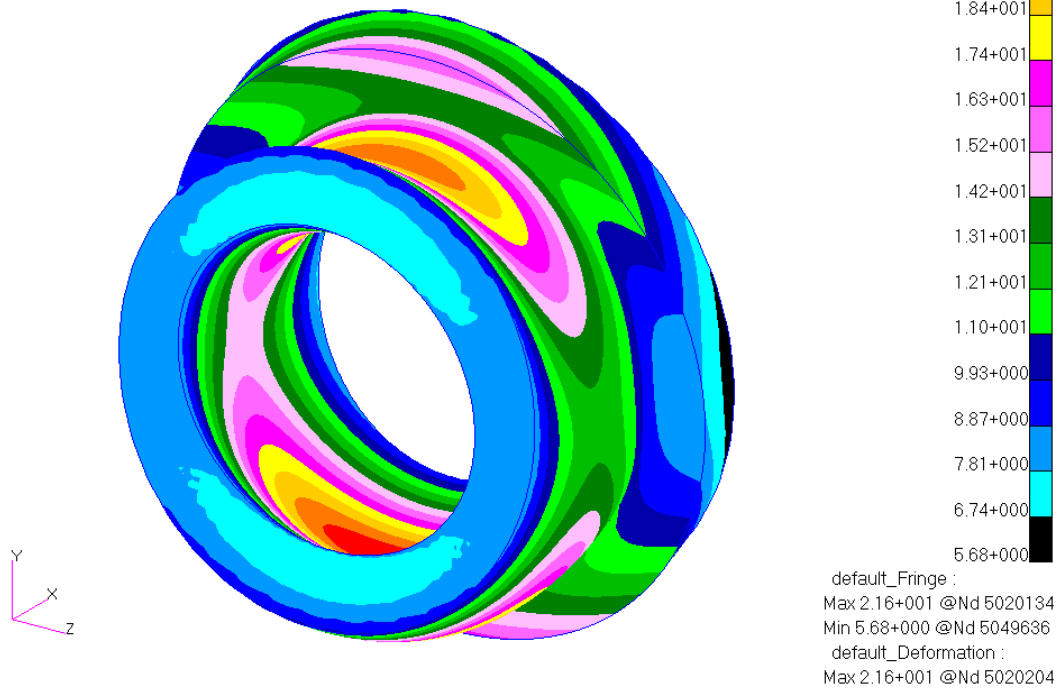


Figura 4. 70: Modo propio 2, estado I (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 20:56:52

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 3:Freq.=11618., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 3:Freq.=11618., Eigenvectors, Translational,

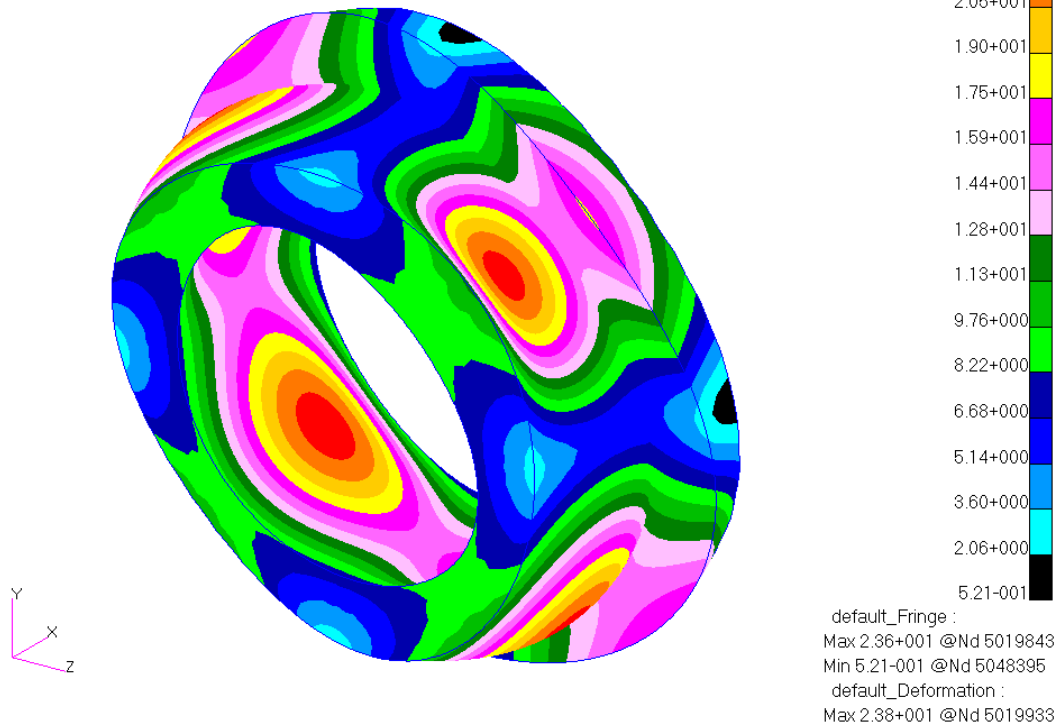


Figura 4. 71: Modo propio 3, estado I (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 20:58:31

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 4:Freq.=11624., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 4:Freq.=11624., Eigenvectors, Translational.

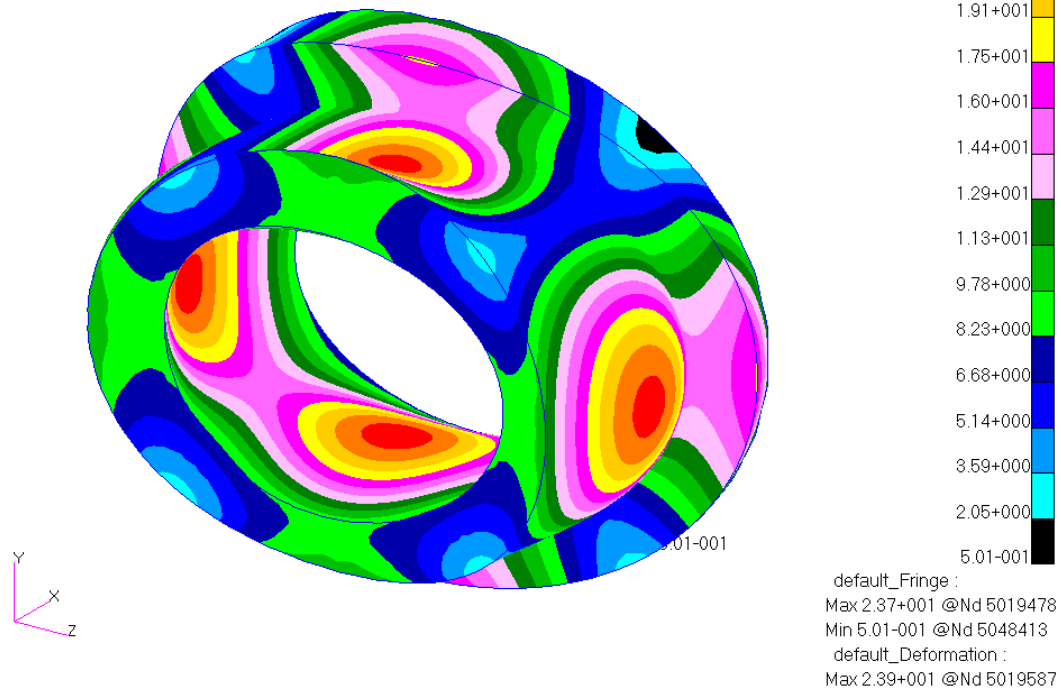


Figura 4. 72: Modo propio 4, estado I (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 20:59:29

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 5:Freq.=14056., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 5:Freq.=14056., Eigenvectors, Translational.

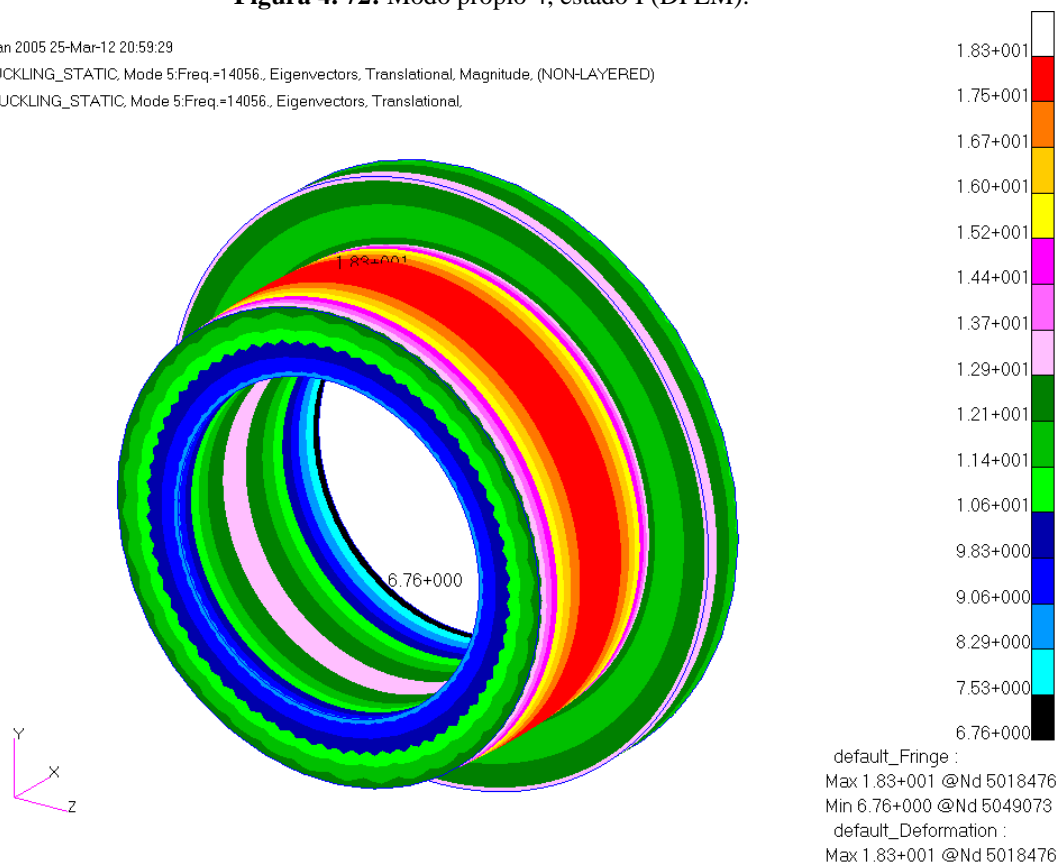


Figura 4. 73: Modo propio 5, estado I (DFEM).

4.2.8. ANÁLISIS MODELO DETALLADO, ESTADO II.

En el estado II vamos a analizar el comportamiento del modelo anterior, si apareciese un defecto en la superficie de **2.5 mm** de ancho (coincide con el espesor de la rebanada a estudiar), **5 mm** de largo y **2.5 mm** de profundidad, en la zona crítica del modelo.

Todas las cotas están “mm”

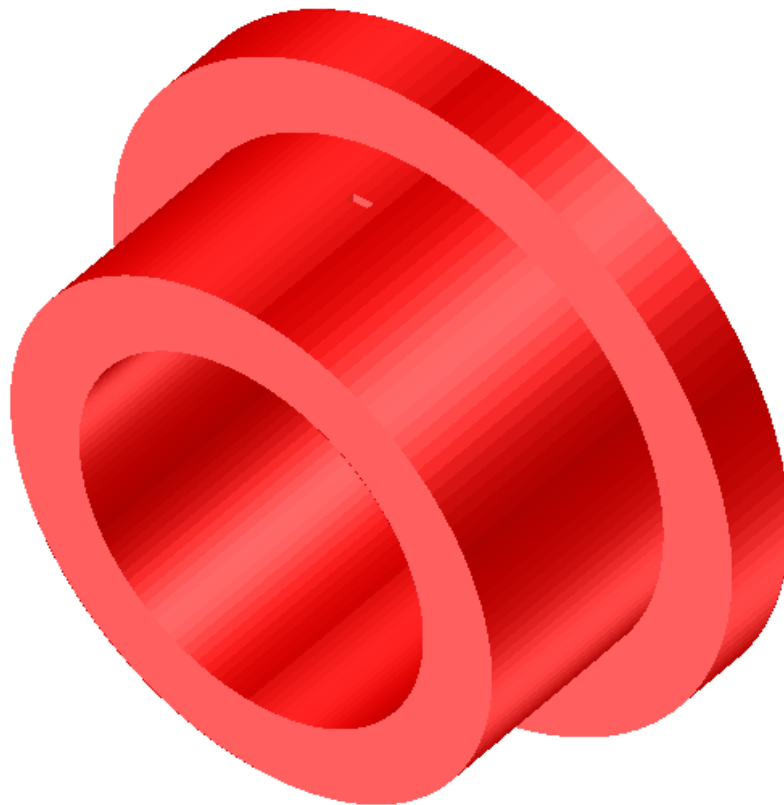


Figura 4. 74: Modelo detallado estado II (DFEM).

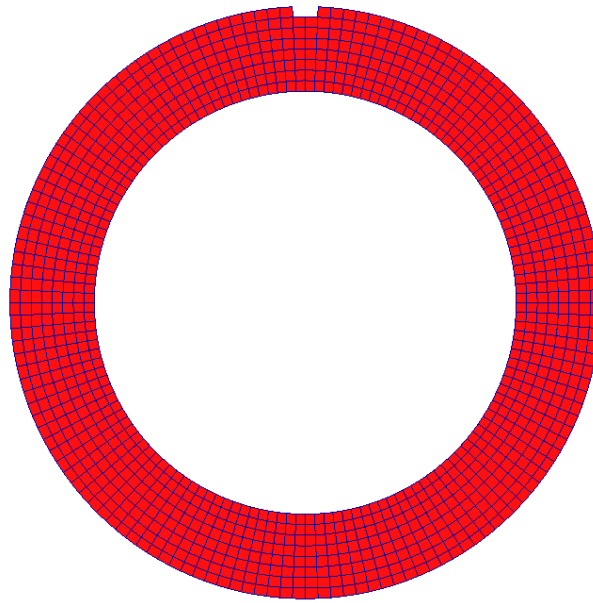


Figura 4. 75: Sección de análisis estado II (DFEM).

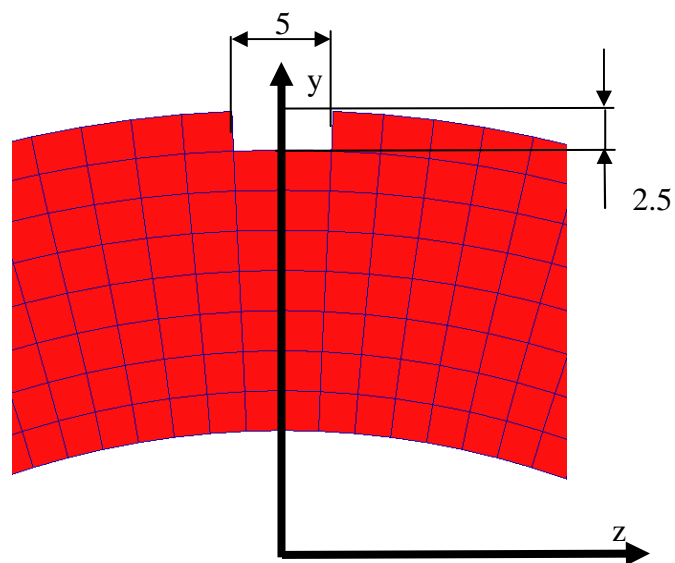


Figura 4. 76: Dimensiones grieta estado II (DFEM).

4.2.8.1 DEFORMACIÓN.

Vamos a sacar resultados de la deformada de la grieta, y comparar la deformación en la superficie, con la deformación que aparece en la base de la fisura.

Para esto hemos sacado los desplazamientos de los nodos que forman los elementos que están en la superficie y de los nodos que forman los elementos del fondo de la grieta.

Primero se va a mostrar la deformada de la sección que se va a analizar.

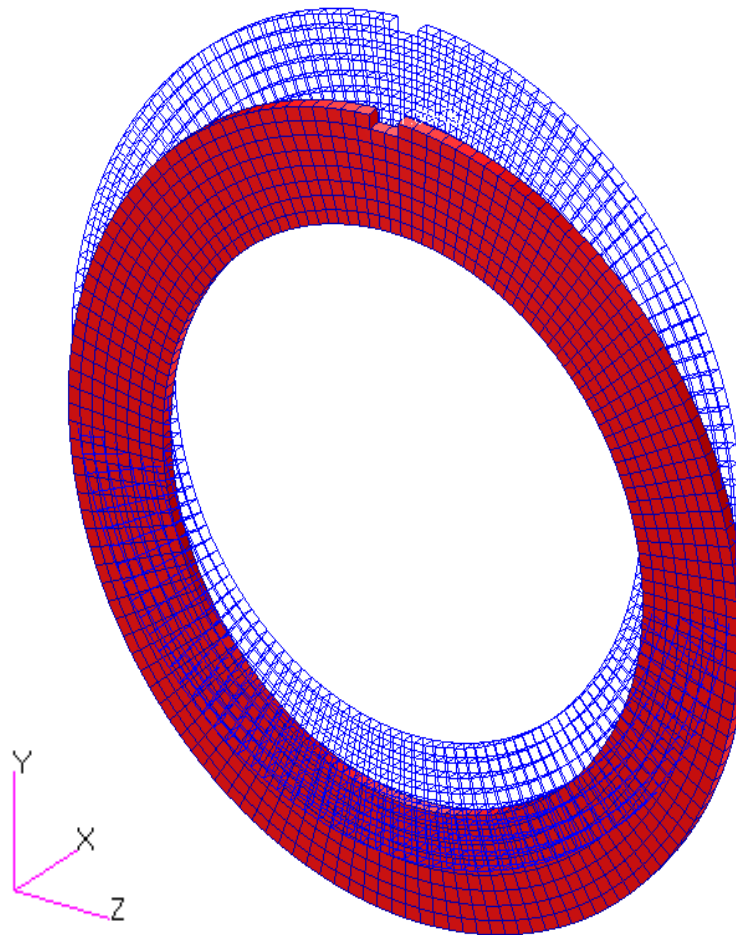


Figura 4. 77: Deformada grieta estado II, vista isométrica (DFEM).

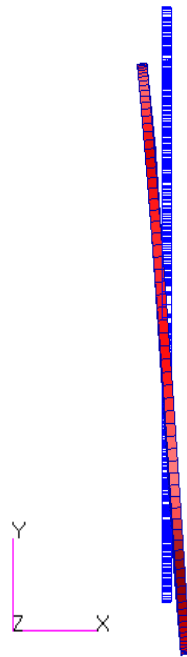


Figura 4. 78: Deformada grieta estado II, vista perfil (DFEM).

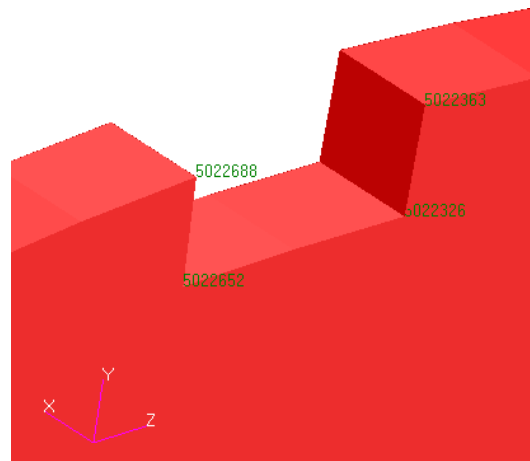


Figura 4. 79: Plot nodos grieta analizar estado II, vista perfil (DFEM).

Tabla 4. 4: Desplazamiento de los nodos, estado II (DFEM).

	Entity ID	Component		
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
superficie	5022363	-0.0606996	-0.12498432	0.00007912
	5022688	-0.06070149	-0.1249757	0.00016524
Fondo	5022652	-0.05773766	-0.12479471	0.00019343
	5022326	-0.057736	-0.12480292	0.00004474

4.2.8.2 TENSIONES.

En la sección del modelo DFEM analizada en el estado II, se encuentra el siguiente nivel de tensiones de **von mises**:

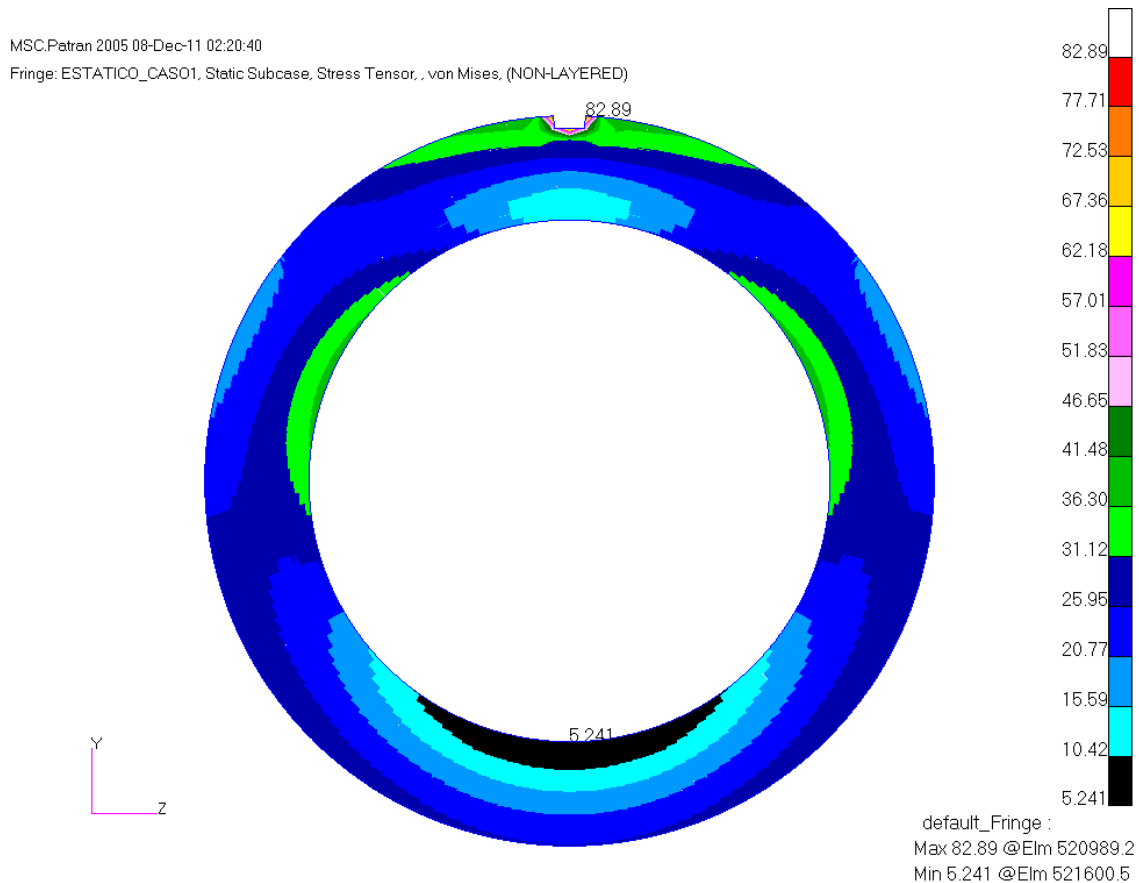


Figura 4. 80: Mapa de tensiones distribuidas sección crítica estado II (DFEM).

La máxima concentración de carga se da en los bordes libres del defecto de la superficie, ya que en estos vértices se acumularán todas las tensiones.

El nivel de tensiones alrededor de la grieta se mantiene constante a un nivel de 36.30 MPa (rango verde) como se puede ver en el Plot de stress.

MSC.Patran 2005 11-Dec-11 10:42:13

Fringe: ESTATICO_CAS01, Static Subcase, Stress Tensor, , von Mises, (NON-LAYERED)

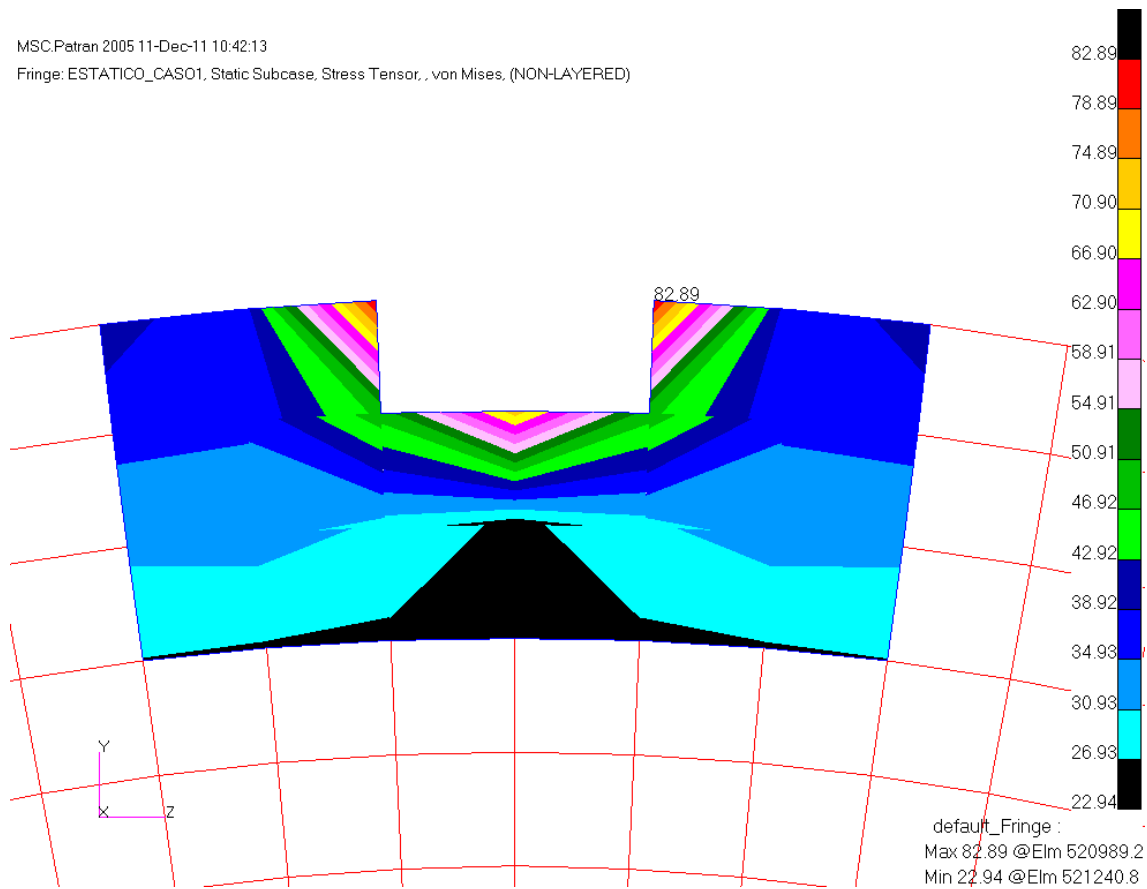


Figura 4. 81: Mapa de tensiones zona de la grieta estado II (DFEM).

La tensión máxima es de **82.89 MPa**.

Analizamos la evolución del **Factor de Reserva**:

$$RF = \frac{F_y}{\sigma_{ESTADO_II}} = \frac{1000MPa}{82.89MPa} = 12.1$$

4.2.8.3 MODOS PROPIOS.

Del estado II se han obtenido las siguientes frecuencias propias y sus respectivos modos propios:

Tabla 4. 5: Frecuencias propias para el estado II (DFEM).

MODE	CYCLES (Hz)
1	1.15E+04
2	1.15E+04
3	1.16E+04
4	1.16E+04
5	1.41E+04

A continuación se mostraran los Plot de los modos propios que aparecen en la tabla 4.5:

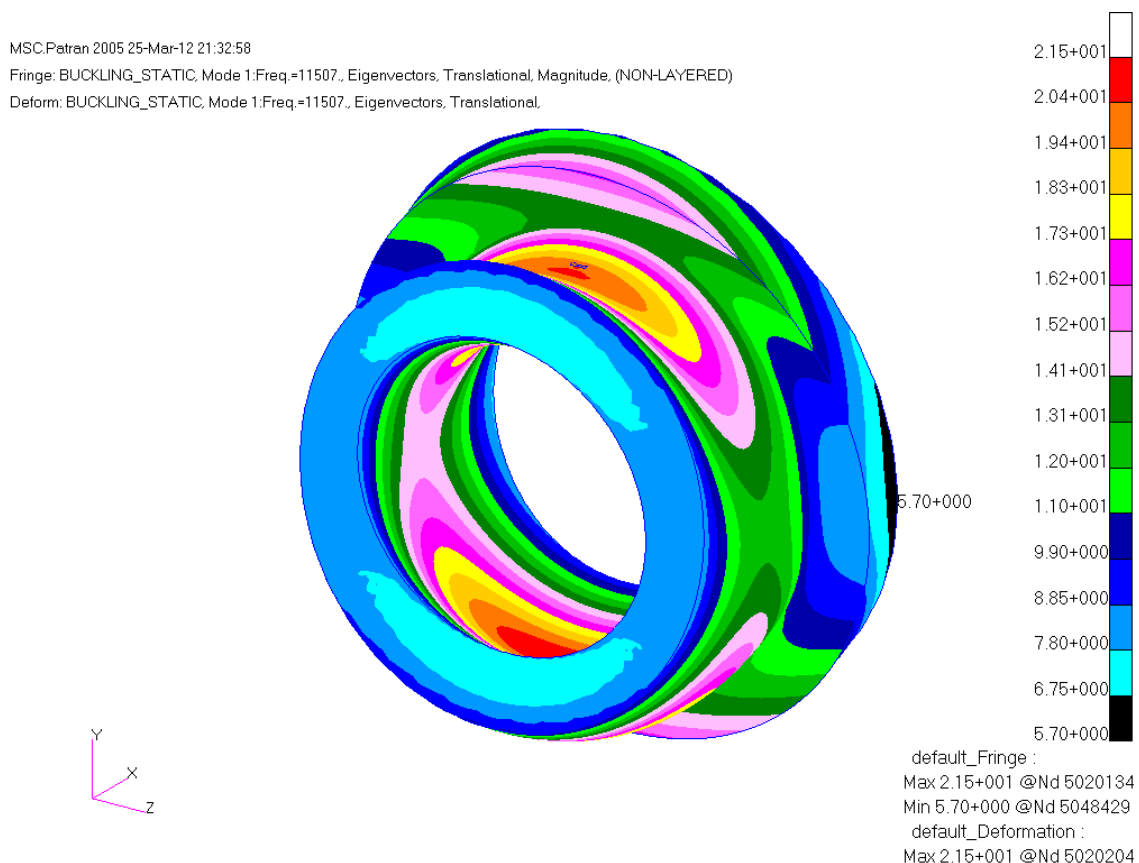
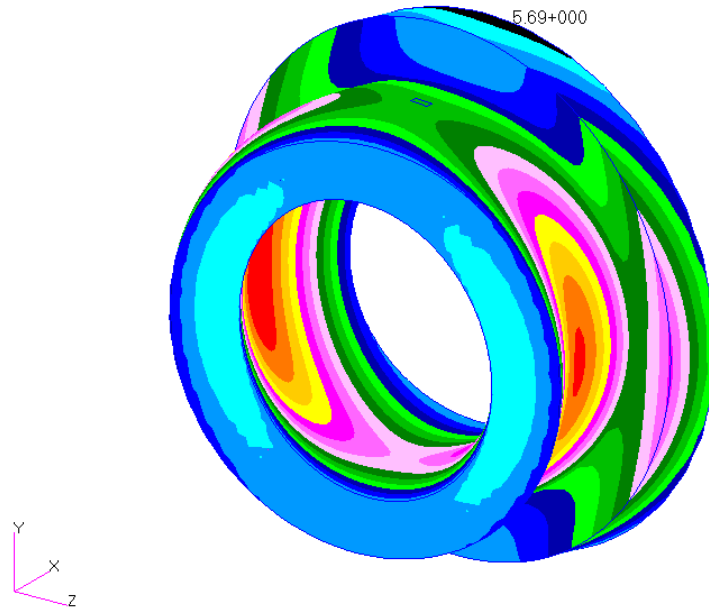


Figura 4. 82: Modo propio 1, estado II (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 21:34:23

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 2:Freq.=11507., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 2:Freq.=11507., Eigenvectors, Translational.



2.14+001
2.03+001
1.93+001
1.82+001
1.72+001
1.61+001
1.51+001
1.41+001
1.30+001
1.20+001
1.09+001
9.87+000
8.83+000
7.78+000
6.74+000
5.69+000

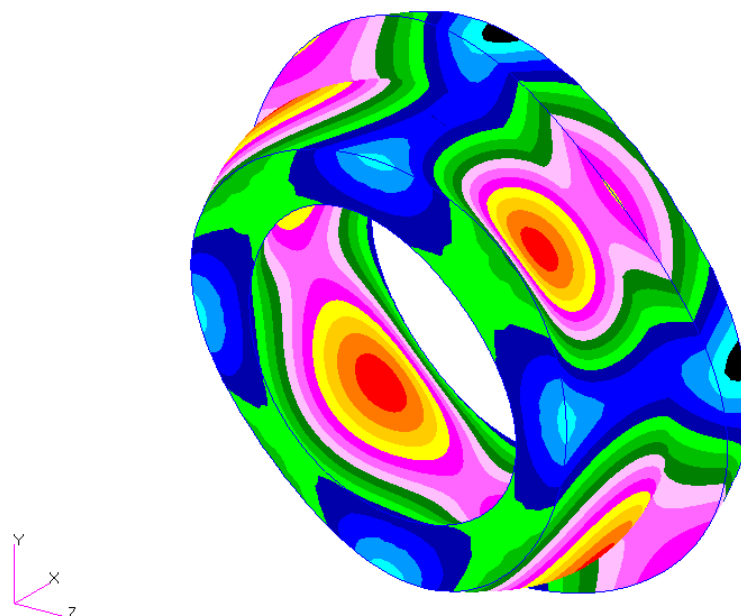
default_Fringe :
Max 2.14+001 @Nd 5020203
Min 5.69+000 @Nd 5047784
default_Deformation :
Max 2.14+001 @Nd 5020239

Figura 4. 83: Modo propio 2, estado II (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 21:35:30

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 3:Freq.=11618., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 3:Freq.=11618., Eigenvectors, Translational.



2.36+001
2.21+001
2.06+001
1.90+001
1.75+001
1.59+001
1.44+001
1.28+001
1.13+001
9.76+000
8.22+000
6.68+000
5.14+000
3.60+000
2.06+000
5.14+001

default_Fringe :
Max 2.36+001 @Nd 5019843
Min 5.14+001 @Nd 5048395
default_Deformation :
Max 2.38+001 @Nd 5019933

Figura 4. 84: Modo propio 3, estado II (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 21:36:01

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 4:Freq.=11623., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 4:Freq.=11623., Eigenvectors, Translational,

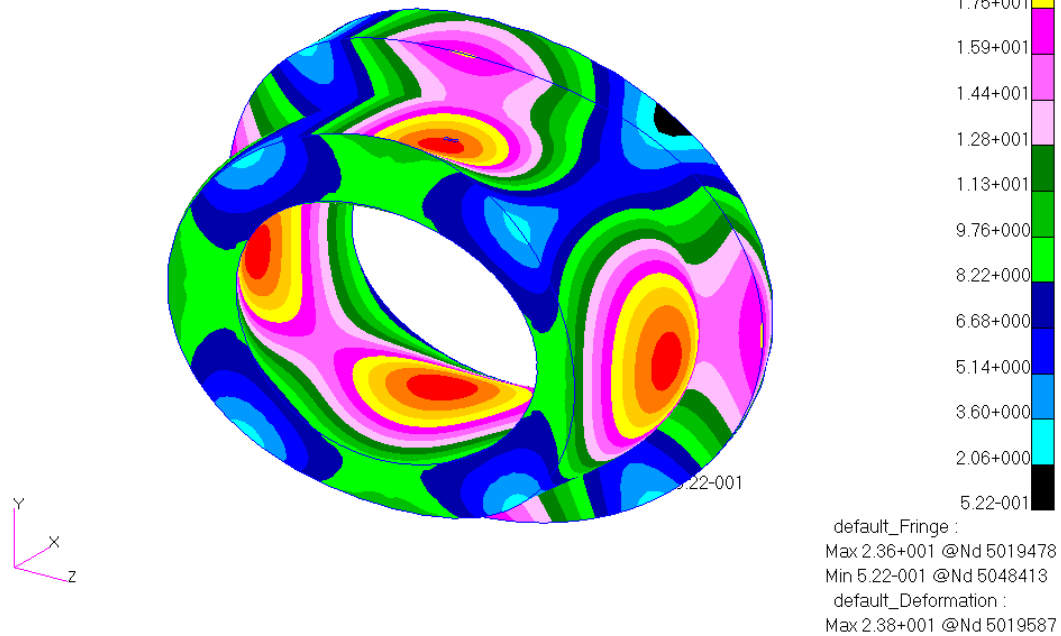


Figura 4. 85: Modo propio 4, estado II (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 21:37:26

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 5:Freq.=14057., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 5:Freq.=14057., Eigenvectors, Translational,

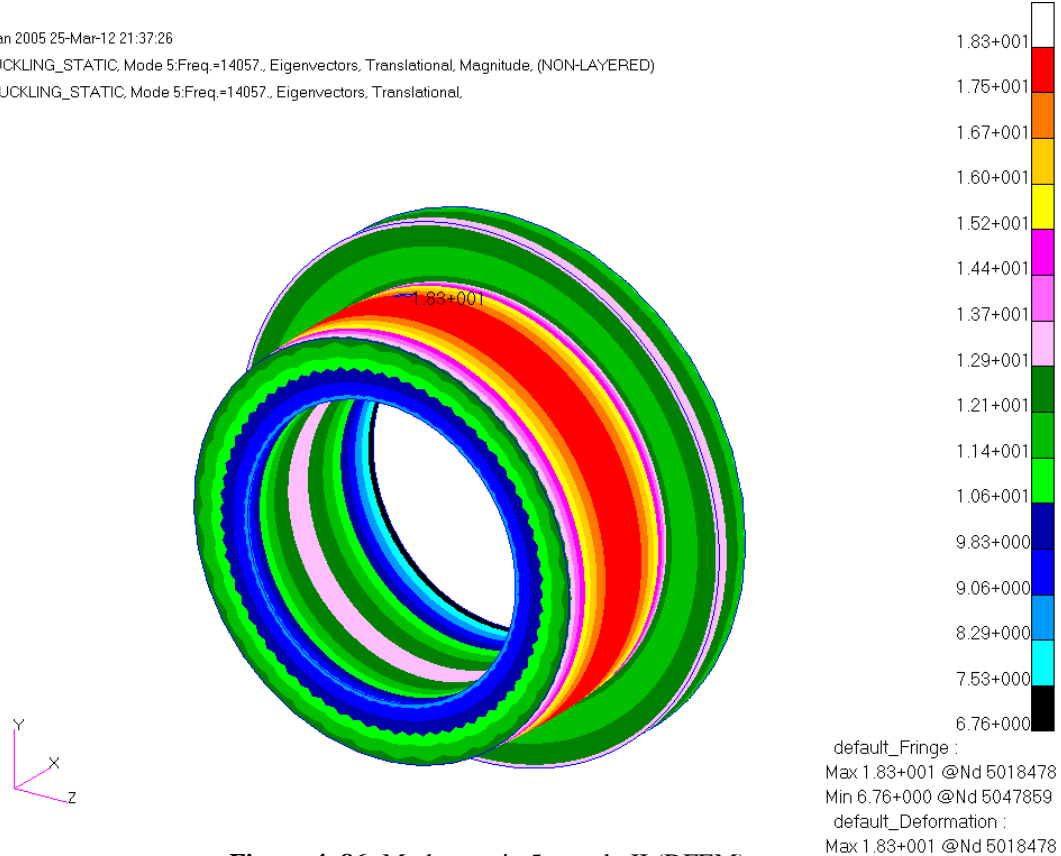


Figura 4. 86: Modo propio 5, estado II (DFEM).

4.2.9. ANÁLISIS MODELO DETALLADO, ESTADO III.

En el estado III vamos a analizar el comportamiento del modelo anterior, si apareciese un defecto en la superficie de **2.5 mm** de ancho (coincide con el espesor de la rebanada a estudiar), **10 mm** de largo y **5 mm** de profundidad, en la zona crítica del modelo.

Todas las cotas están “mm”

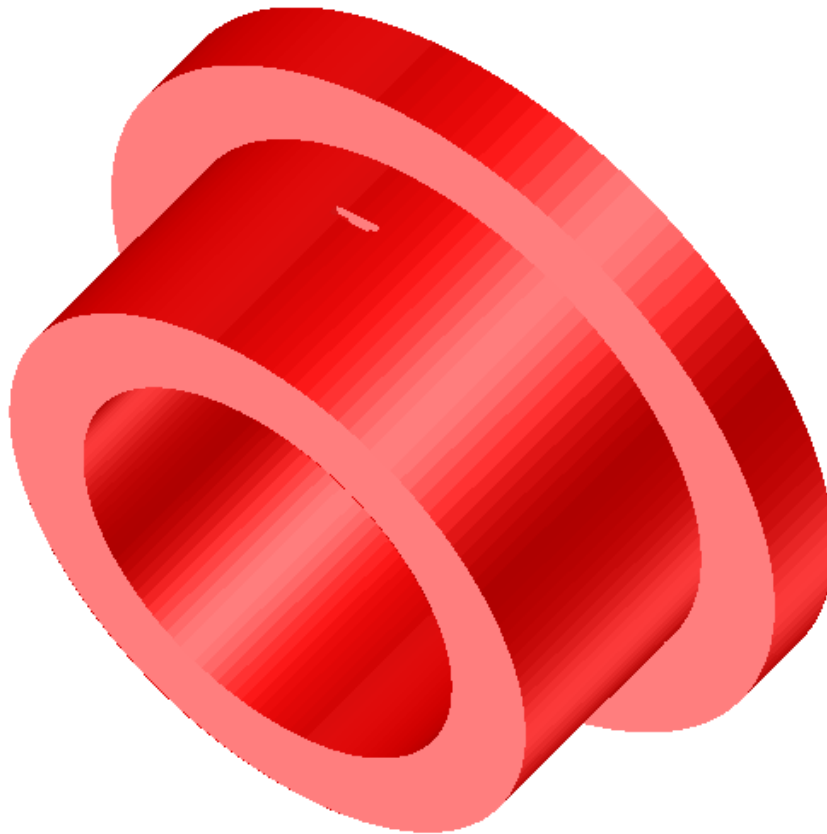


Figura 4. 87: Modelo detallado estado III (DFEM).

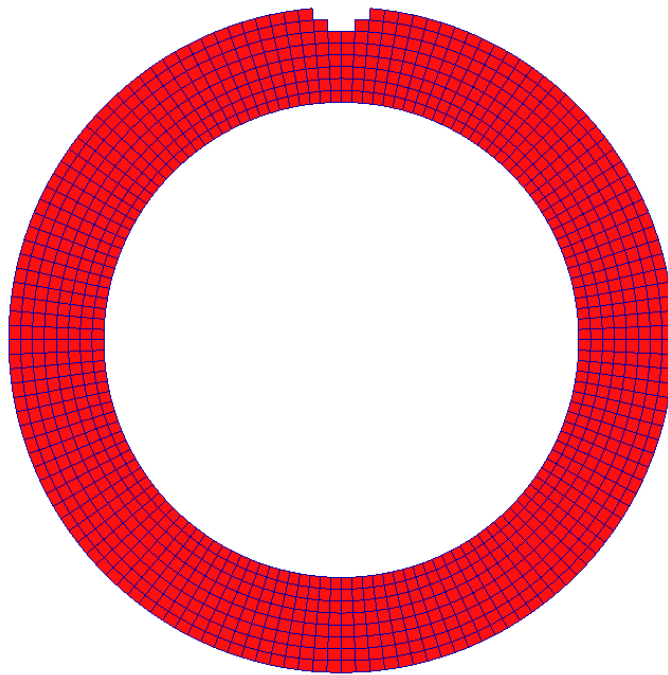


Figura 4. 88: Sección de análisis estado III (DFEM).

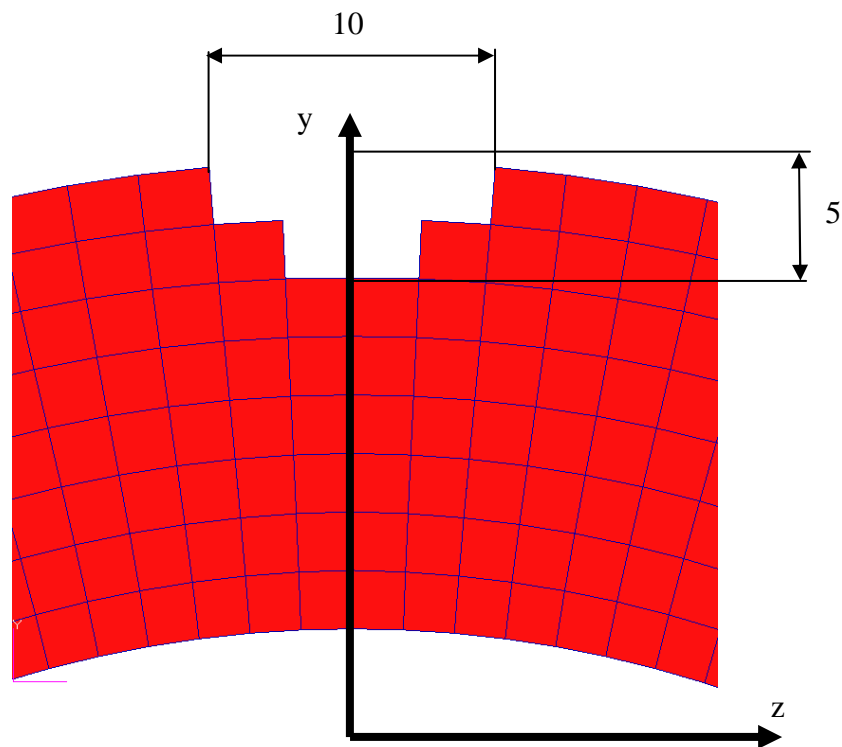


Figura 4. 89: Dimensiones grieta estado III (DFEM).

4.2.9.1 DEFORMACIÓN.

Vamos a sacar resultados de la deformada de la grieta y comparar la deformación en la superficie, con la deformación que aparece en la base de la fisura.

Para esto hemos sacado los desplazamientos de los nodos que forman los elementos que están en la superficie y de los nodos que forman los elementos del fondo de la grieta.

Primero se va a mostrar la deformada de la sección que se va a analizar.

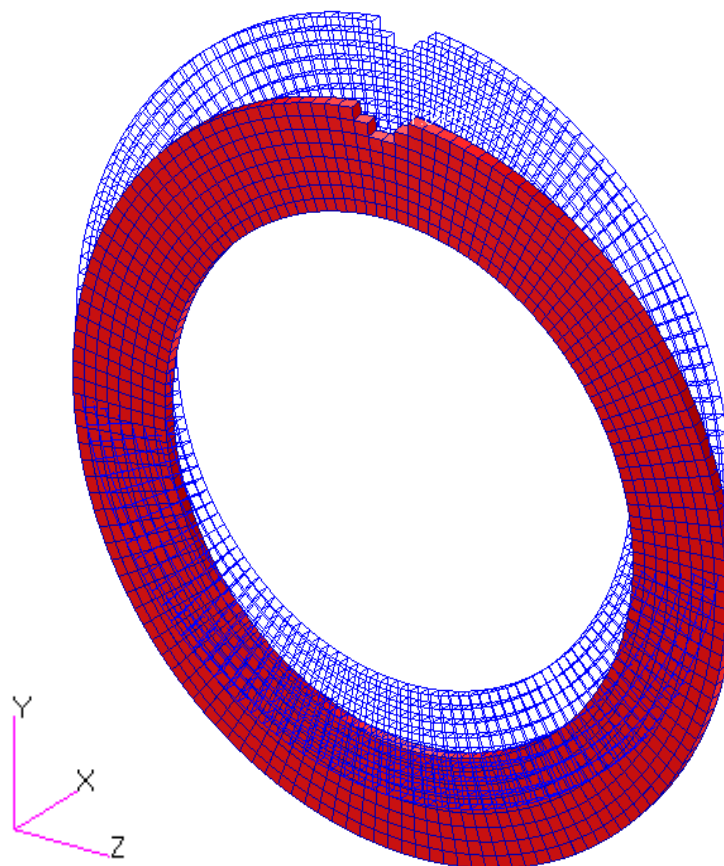


Figura 4. 90: Deformada grieta estado III, vista isométrica (DFEM).

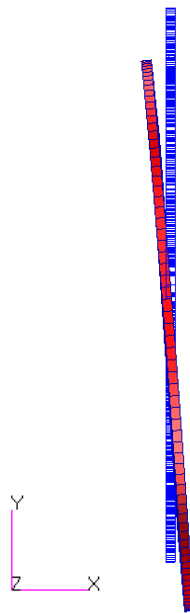


Figura 4. 91: Deformada grieta estado III, vista perfil (DFEM).

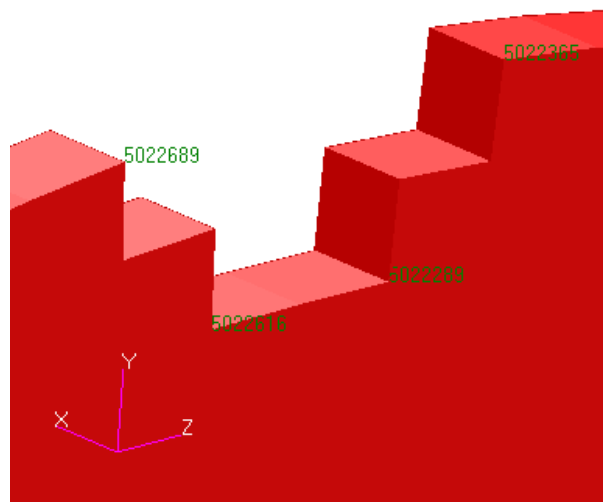


Figura 4. 92: Plot nodos grieta analizar estado III, vista perfil (DFEM).

Tabla 4. 6: Desplazamiento de los nodos, estado III (DFEM).

	Entity ID	Component		
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
superficie	5022689	-0.06062782	-0.12478668	0.00024271
	5022365	-0.06062449	-0.12480366	-4E-08
fondo	5022289	-0.05499795	-0.12440484	0.00006881
	5022616	-0.0549998	-0.12439688	0.00016295

4.2.9.2 TENSIONES.

En la sección del modelo DFEM analizada en el estado III, se encuentra el siguiente nivel de tensiones de **von mises**:

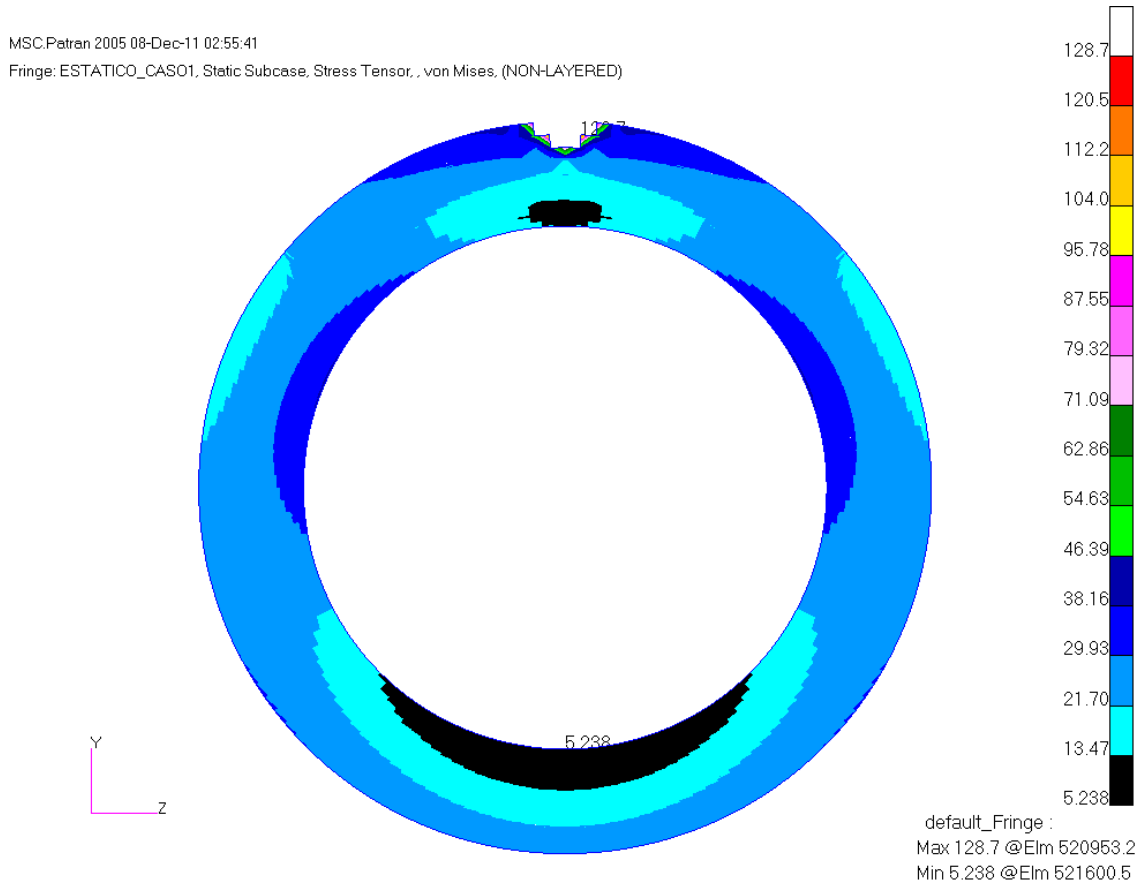


Figura 4. 93: Mapa de tensiones distribuidas sección crítica estado III (DFEM).

La máxima concentración de carga se da en los bordes libres del defecto de la superficie, ya que en estos vértices se acumularán todas las tensiones, como en el estado II.

El nivel de tensiones alrededor de la grieta se mantiene constante a un nivel de 38.16 MPa (rango azul oscuro), como se puede ver en el Plot de stress.

MSC.Patran 2005 11-Dec-11 10:51:05

Fringe: ESTATICO_CAS01, Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, (NON-LAYERED)

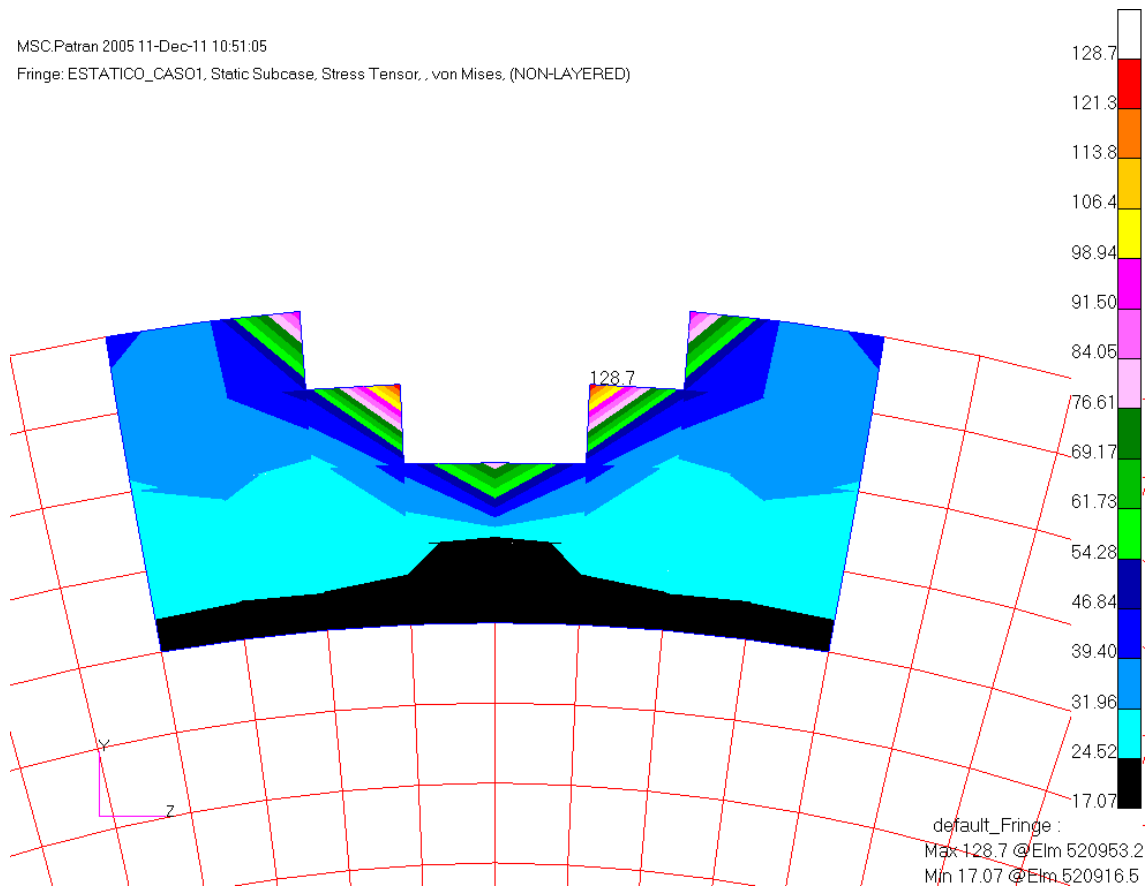


Figura 4. 94: Mapa de tensiones zona de la grieta estado III (DFEM).

La tensión máxima es de **128.7 MPa**.

Analizamos la evolución del **Factor de Reserva**:

$$RF = \frac{F_y}{\sigma_{ESTADO_III}} = \frac{1000MPa}{128.7MPa} = 7.77$$

4.2.9.3 MODOS PROPIOS.

Del estado III se han obtenido las siguientes frecuencias propias y sus respectivos modos propios:

Tabla 4. 7: Frecuencias propias para el estado III (DFEM).

MODE	CYCLES (Hz)
1	1.15E+04
2	1.15E+04
3	1.16E+04
4	1.16E+04
5	1.41E+04

A continuación se mostraran los Plot de los modos propios que aparecen en la tabla 4.7:

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 22:16:12

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11504., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11504., Eigenvectors, Translational.

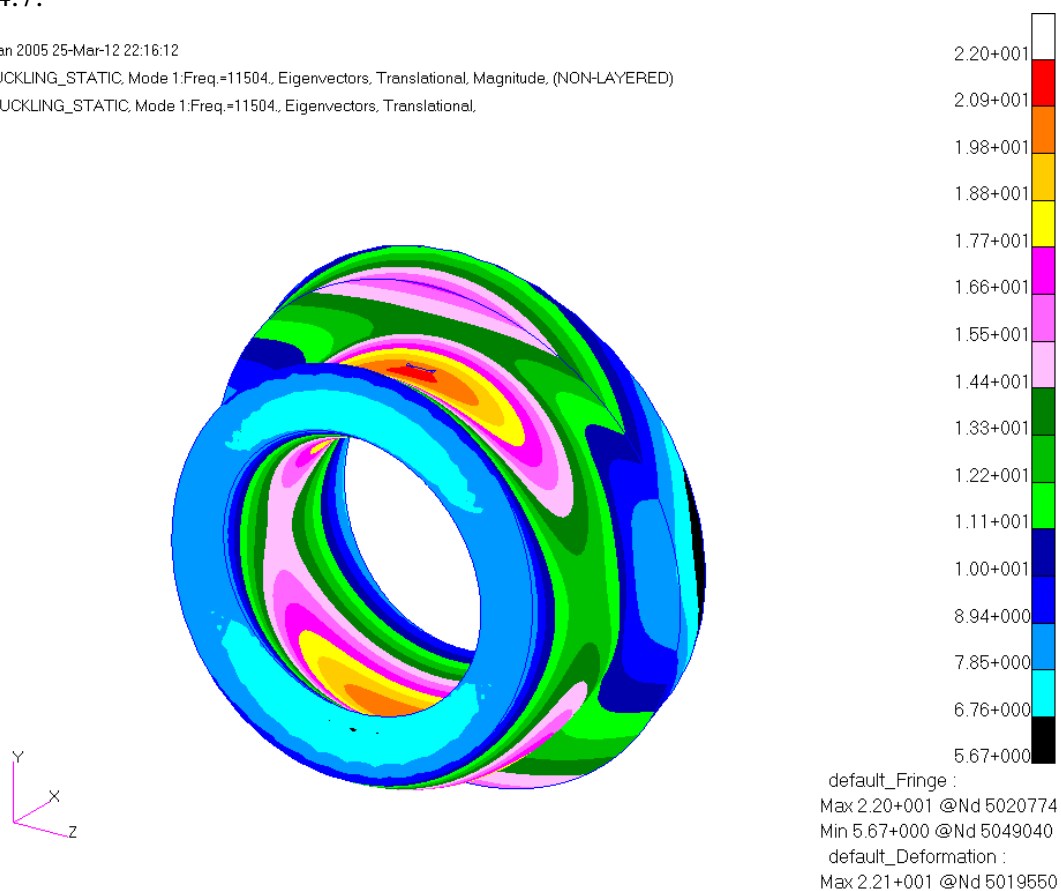
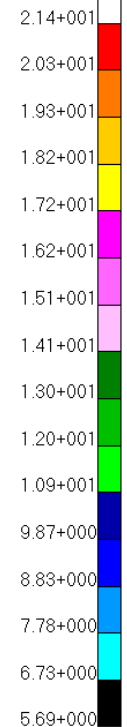
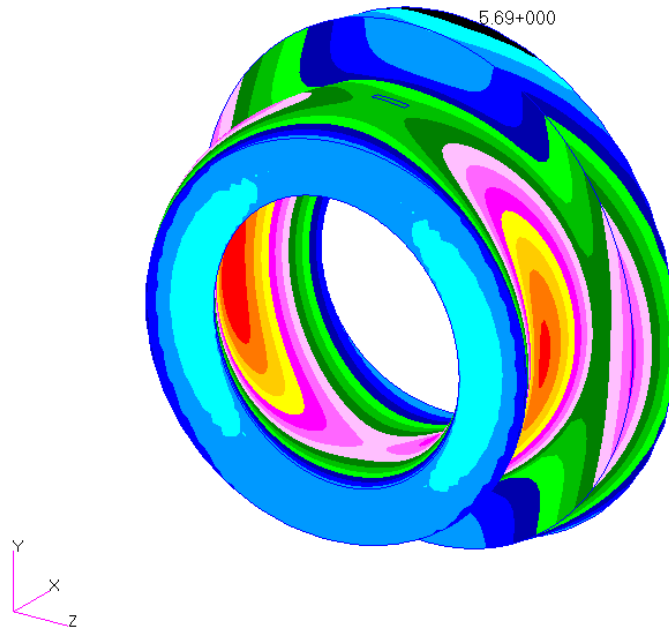


Figura 4. 95: Modo propio 1, estado III (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 22:45:22

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 2:Freq.=11508., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 2:Freq.=11508., Eigenvectors, Translational,



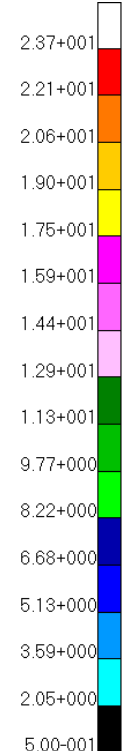
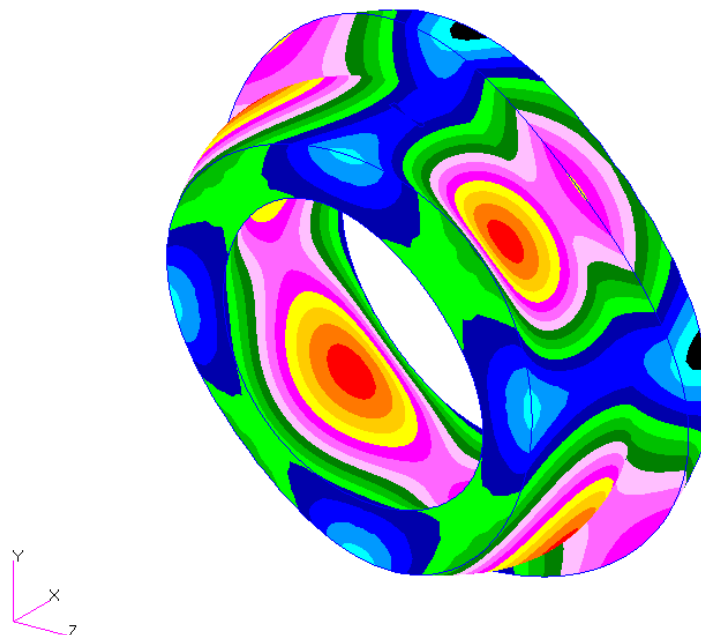
default_Fringe :
 Max 2.14+001 @Nd 5020203
 Min 5.69+000 @Nd 5047784
 default_Deformation :
 Max 2.14+001 @Nd 5020239

Figura 4. 96: Modo propio 2, estado III (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 22:48:44

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 3:Freq.=11618., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 3:Freq.=11618., Eigenvectors, Translational,



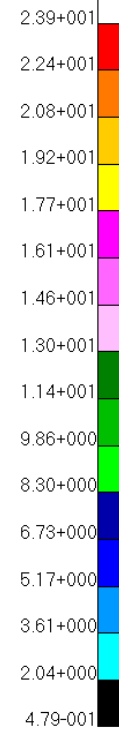
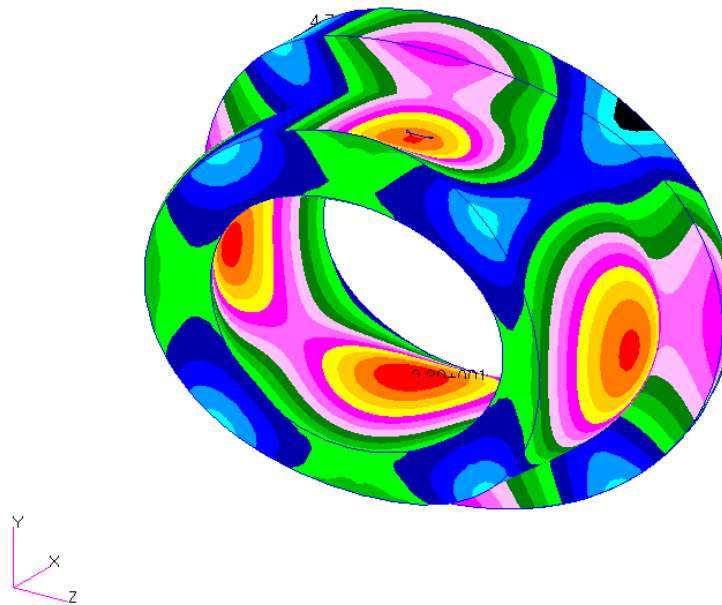
default_Fringe :
 Max 2.37+001 @Nd 5019843
 Min 5.00-001 @Nd 5048395
 default_Deformation :
 Max 2.39+001 @Nd 5019933

Figura 4. 97: Modo propio 3, estado III (DFEM).

MSC:Patran 2005 25-Mar-12 22:49:20

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 4:Freq.=11620., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 4:Freq.=11620., Eigenvectors, Translational,



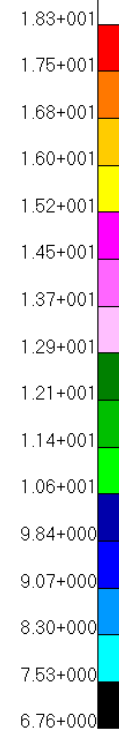
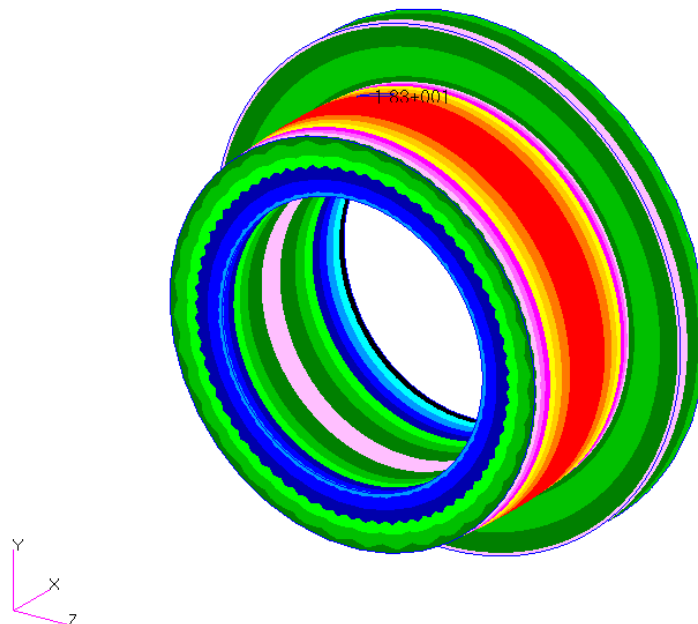
default_Fringe :
Max 2.39+001 @Nd 5020134
Min 4.79-001 @Nd 5049024
default_Deformation :
Max 2.41+001 @Nd 5020240

Figura 4. 98: Modo propio 4, estado III (DFEM).

MSC:Patran 2005 25-Mar-12 22:49:53

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 5:Freq.=14058., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 5:Freq.=14058., Eigenvectors, Translational,



default_Fringe :
Max 1.83+001 @Nd 5018477
Min 6.76+000 @Nd 5047859
default_Deformation :
Max 1.83+001 @Nd 5018477

Figura 4. 99: Modo propio 5, estado III (DFEM).

4.2.10. ANÁLISIS MODELO DETALLADO, ESTADO IV.

En el estado IV vamos a analizar el comportamiento del modelo anterior si apareciese un defecto en la superficie de **2.5 mm** de ancho (coincide con el espesor de la rebanada a estudiar), **15 mm** de largo y **7.5 mm** de profundidad, en la zona crítica del modelo.

Todas las cotas están “mm”

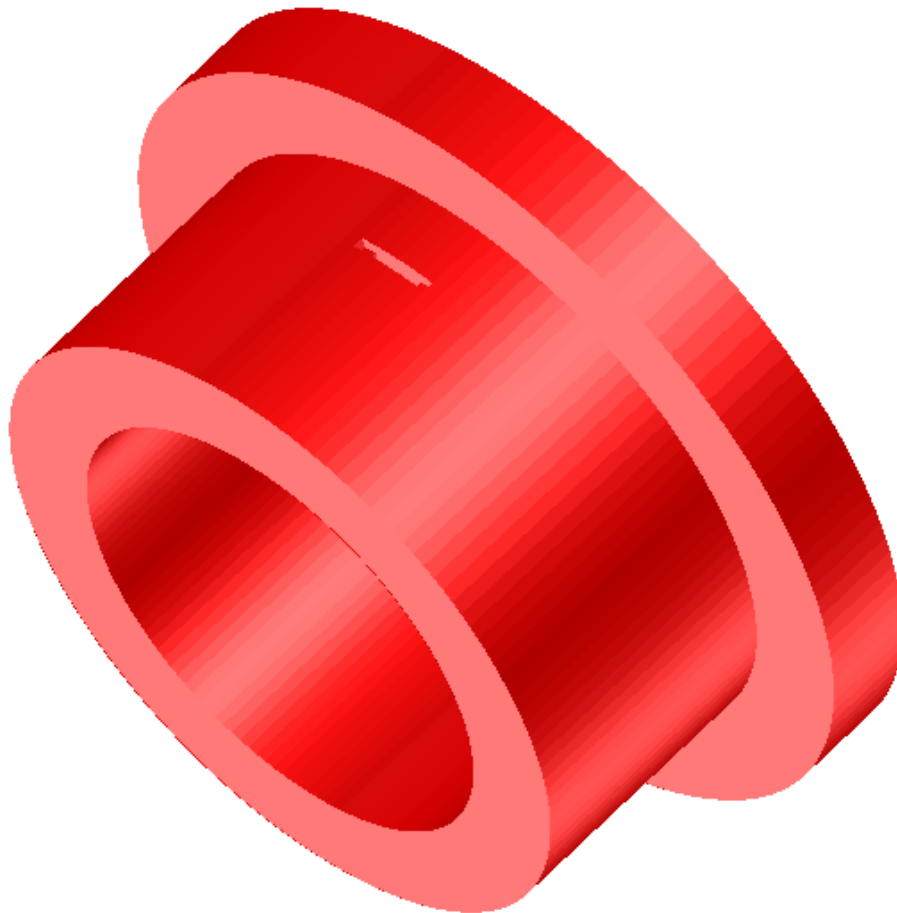


Figura 4. 100: Modelo detallado estado IV (DFEM).

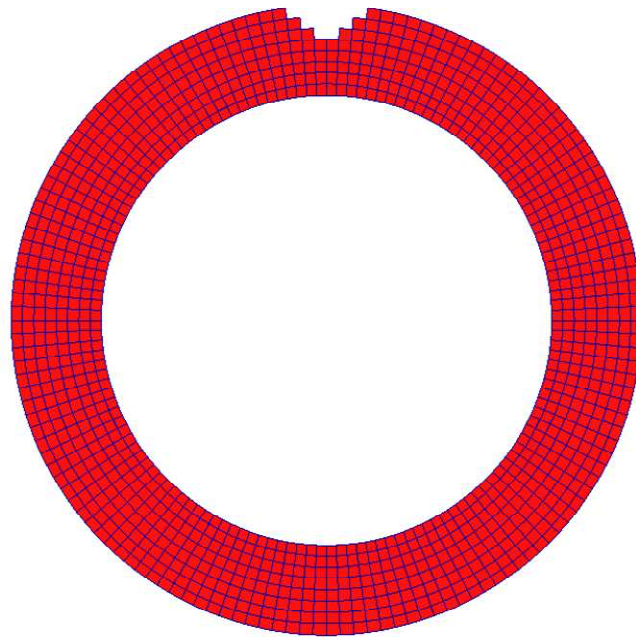


Figura 4. 101: Sección de análisis estado IV (DFEM).

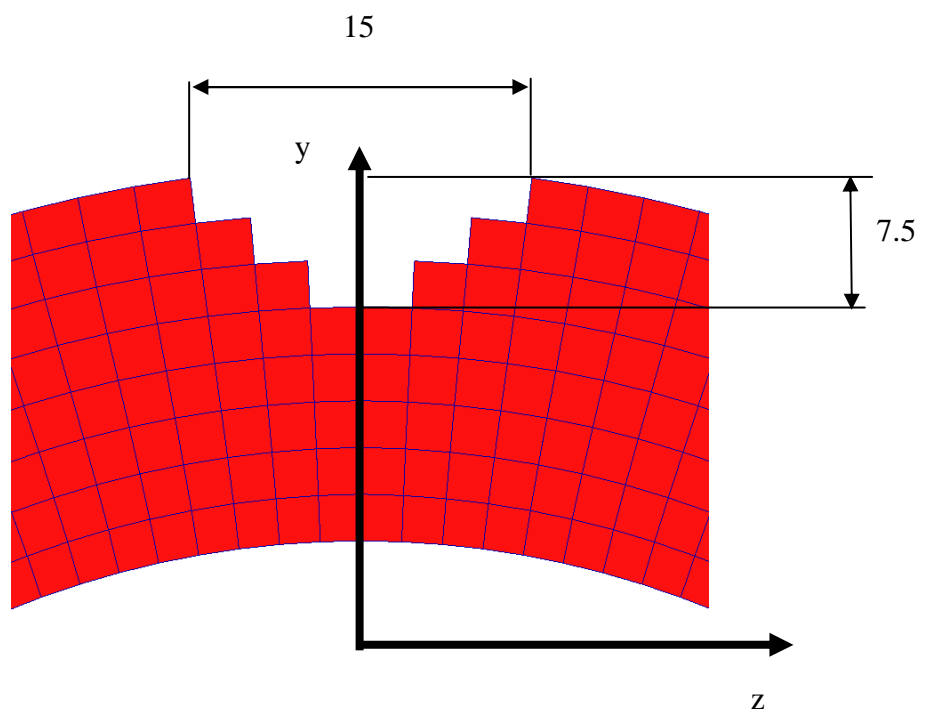


Figura 4. 102: Dimensiones grieta estado IV (DFEM).

4.2.10.1 DEFORMACIÓN.

Vamos a sacar resultados de la deformada de la grieta y comparar la deformación en la superficie, con la deformación que aparece en la base de la fisura.

Para esto hemos sacado los desplazamientos de los nodos que forman los elementos que están en la superficie y de los nodos que forman los elementos del fondo de la grieta.

Primero se va a mostrar la deformada de la sección que se va a analizar.

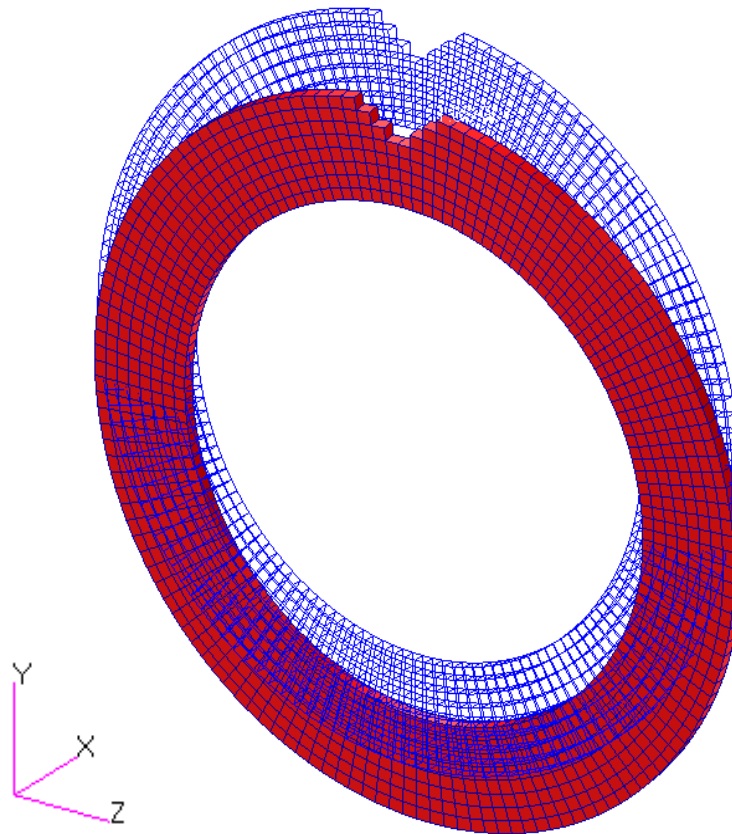


Figura 4. 103: Deformada grieta estado IV, vista isométrica (DFEM).

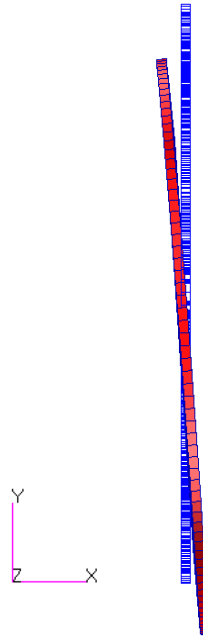


Figura 4. 104: Deformada grieta estado IV, vista perfil (DFEM).

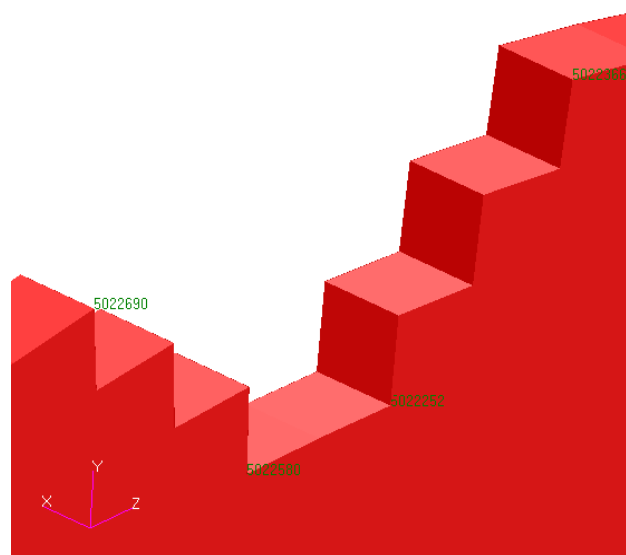


Figura 4. 105: Plot nodos grieta analizar estado IV, vista perfil (DFEM).

Tabla 4. 8: Desplazamiento de los nodos, estado IV (DFEM).

	Entity ID	Component		
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
superficie	5022690	-0.06040174	-0.12453394	0.00030499
	5022366	-0.0603972	-0.12455884	-0.0000647
fondo	5022252	-0.0523114	-0.12398443	0.00010172
	5022580	-0.05231339	-0.12397674	0.00012393

4.2.10.2 TENSIONES.

En la sección del modelo DFEM analizada en el estado IV, se encuentra el siguiente nivel de tensiones de **von mises**:

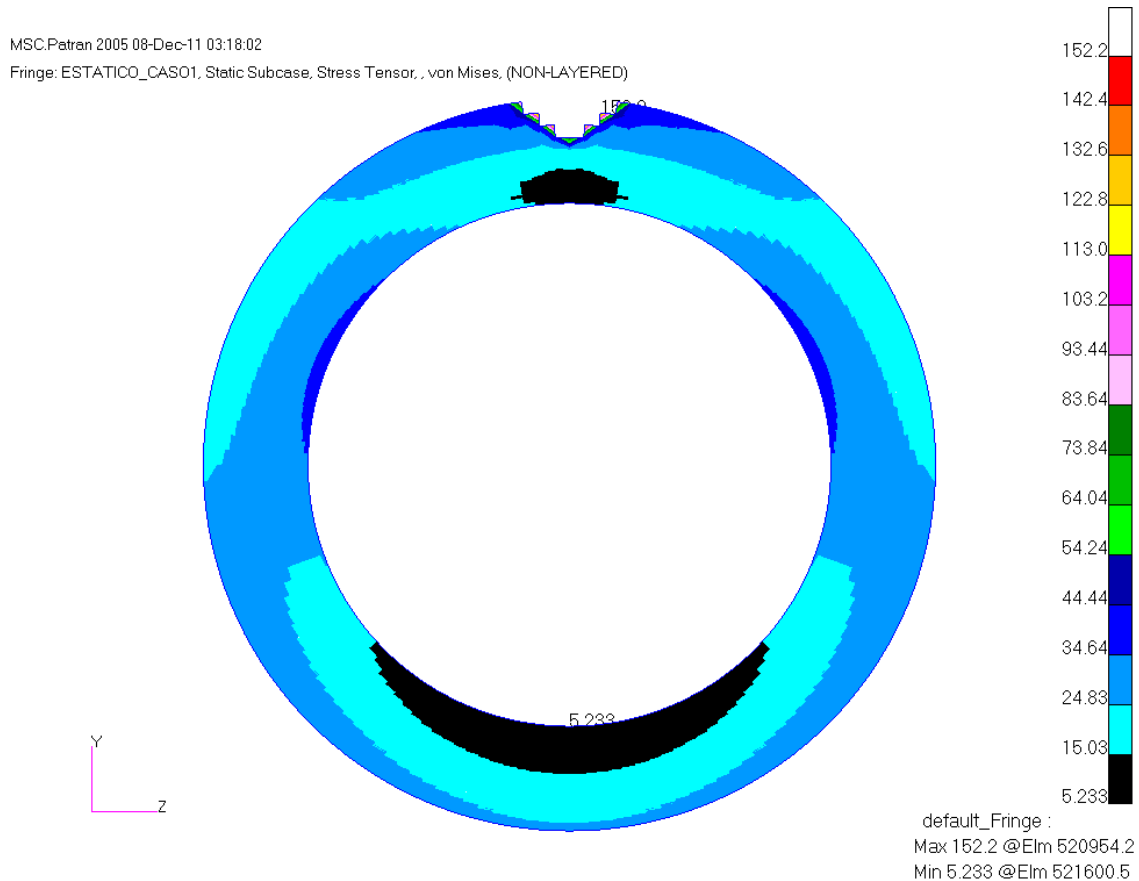


Figura 4. 106: Mapa de tensiones distribuidas sección crítica estado IV (DFEM).

La máxima concentración de carga se da en los bordes libres del defecto de la superficie, ya que en estos vértices se acumularan todas las tensiones, como en el estado II.

El nivel de tensiones alrededor de la grieta se mantiene constante a un nivel de 44.44 MPa (rango azul oscuro) como se puede ver en el Plot de stress.

MSC.Patran 2005 11-Dec-11 10:53:41

Fringe: ESTATICO_CAS01, Static Subcase, Stress Tensor, von Mises, (NON-LAYERED)

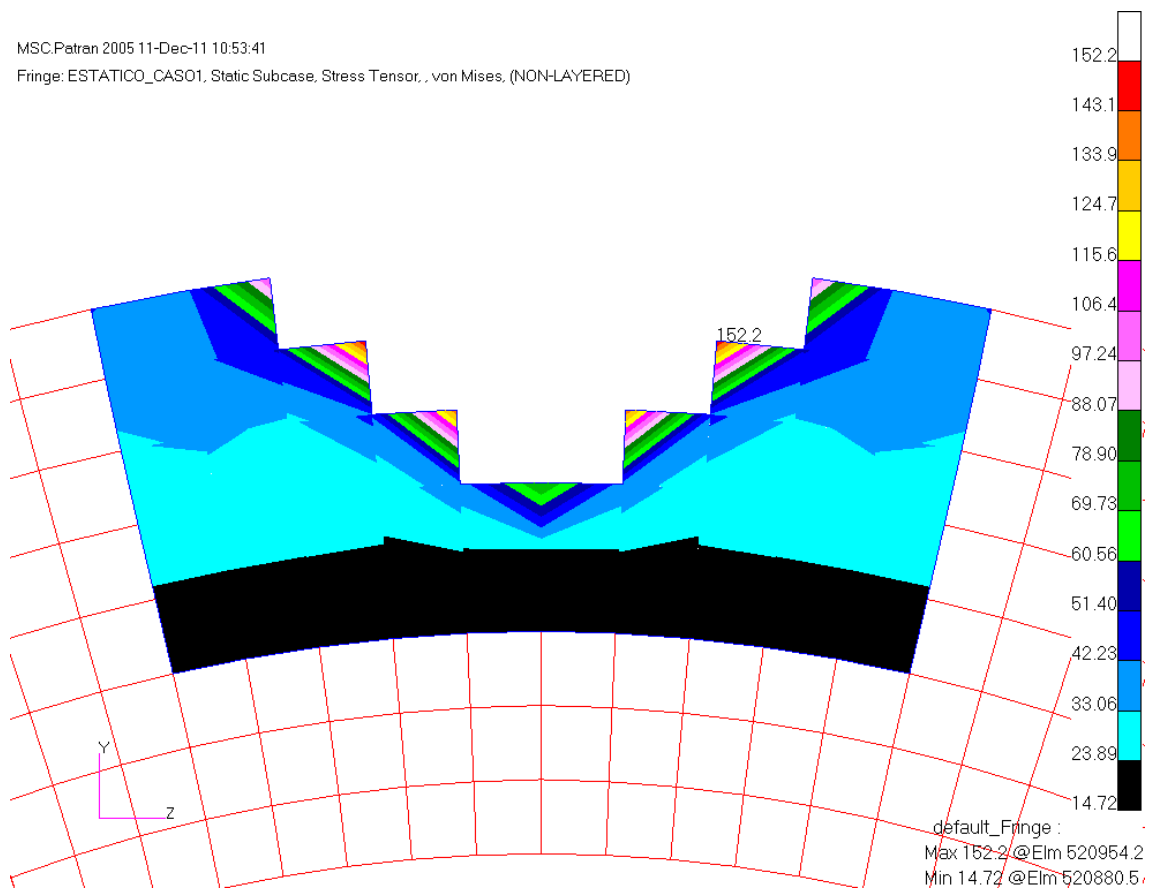


Figura 4. 107: Mapa de tensiones zona de la grieta estado IV (DFEM).

La tensión máxima es de **152.2 MPa**.

Analizamos la evolución del **Factor de Reserva**:

$$RF = \frac{F_y}{\sigma_{ESTADO_IV}} = \frac{1000MPa}{152.2MPa} = 6.57$$

4.2.10.3 MODOS PROPIOS.

Del estado IV se han obtenido las siguientes frecuencias propias y sus respectivos modos propios:

Tabla 4. 9: Frecuencias propias para el estado IV (DFEM).

MODE	CYCLES (Hz)
1	1.15E+04
2	1.15E+04
3	1.16E+04
4	1.16E+04
5	1.41E+04

A continuación se mostraran los Plot de los modos propios que aparecen en la tabla 4.9:

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 23:22:52

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11499., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11499., Eigenvectors, Translational,

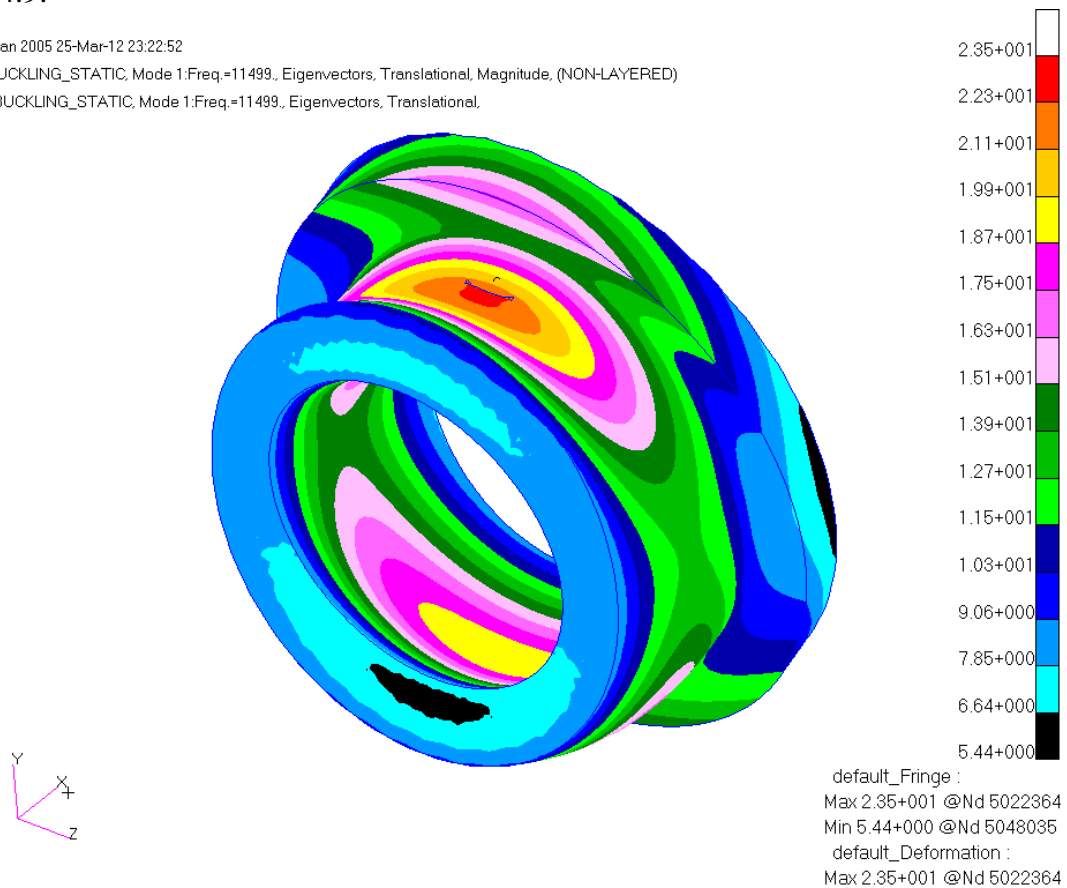


Figura 4. 108: Modo propio 1, estado IV (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 23:23:31

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 2:Freq.=11508., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 2:Freq.=11508., Eigenvectors, Translational,

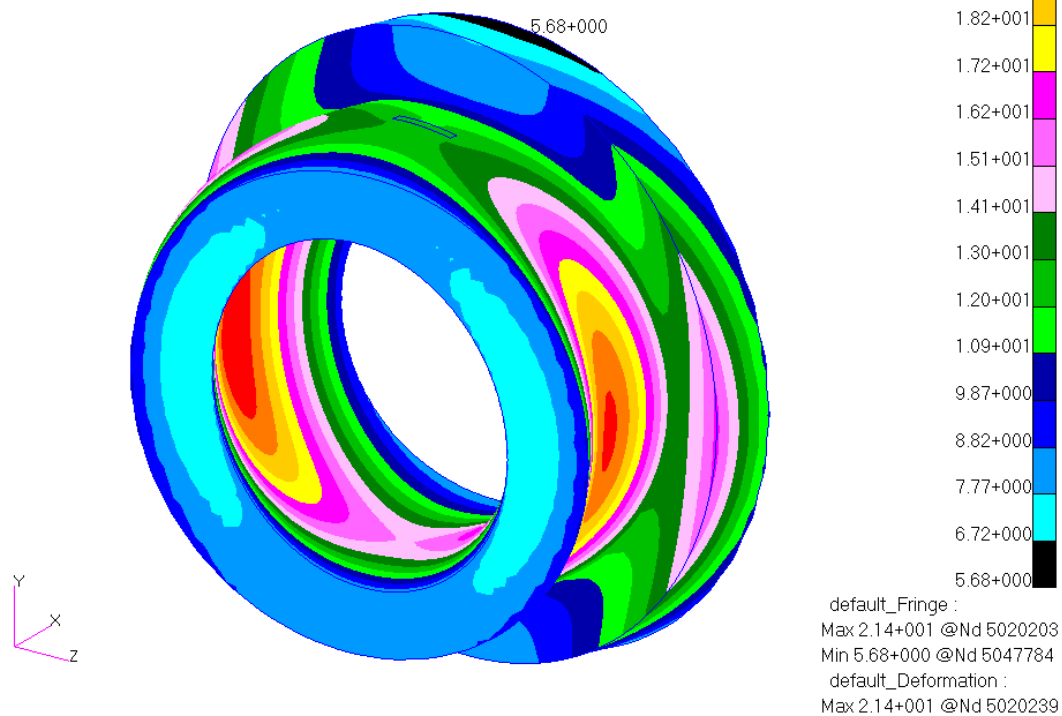


Figura 4. 109: Modo propio 2, estado IV (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 23:24:16

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 3:Freq.=11614., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 3:Freq.=11614., Eigenvectors, Translational,

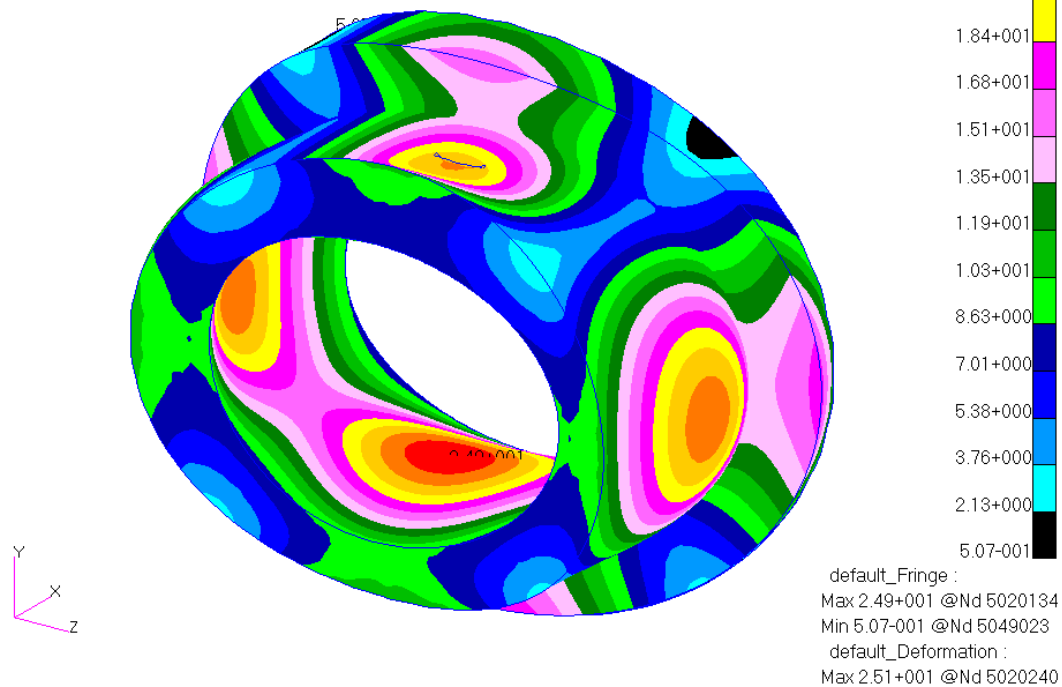


Figura 4. 110: Modo propio 3, estado IV (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 23:24:45

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 4:Freq.=11618., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 4:Freq.=11618., Eigenvectors, Translational,

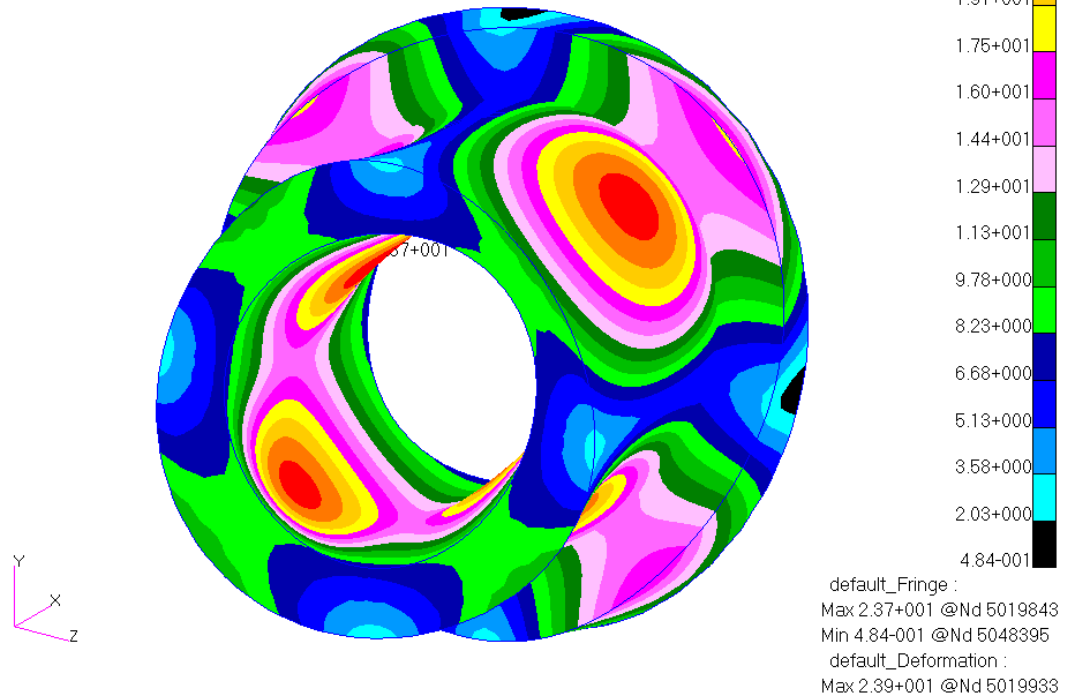


Figura 4. 111: Modo propio 4, estado IV (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 23:25:07

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 5:Freq.=14059., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 5:Freq.=14059., Eigenvectors, Translational,

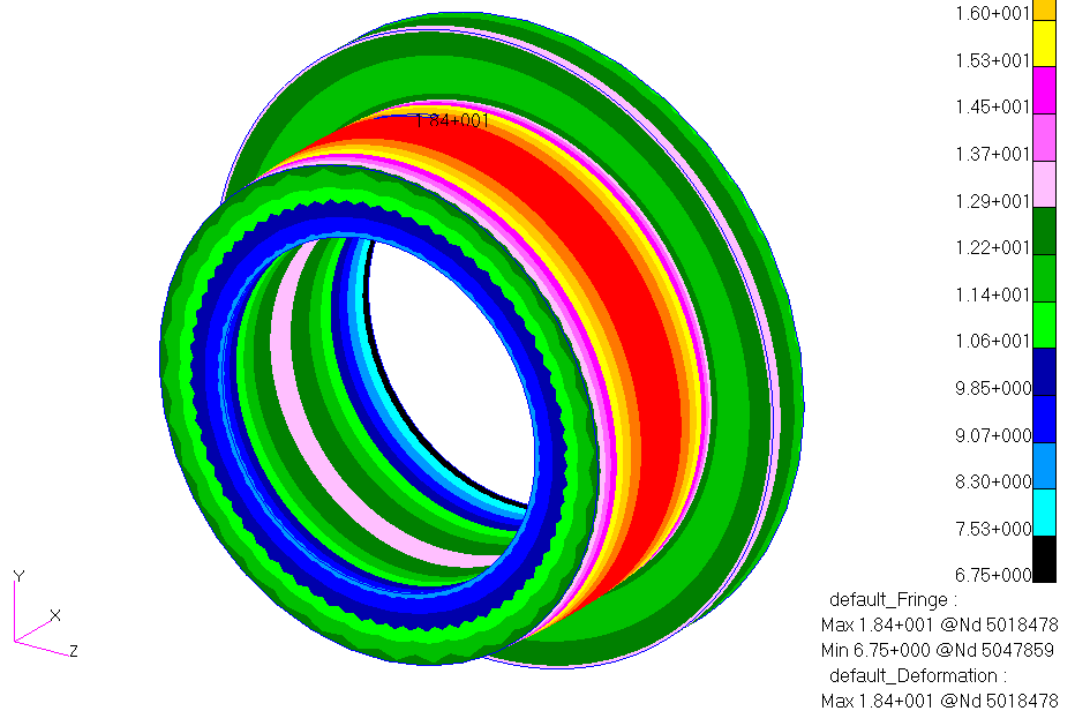


Figura 4. 112: Modo propio 5, estado IV (DFEM).

4.2.11. ANÁLISIS MODELO DETALLADO, ESTADO V.

En el estado IV vamos a analizar el comportamiento del modelo anterior si apareciese un defecto en la superficie de **2.5 mm** de ancho (coincide con el espesor de la rebanada a estudiar), **20 mm** de largo y **10 mm** de profundidad, en la zona crítica del modelo.

Todas las cotas están “mm”

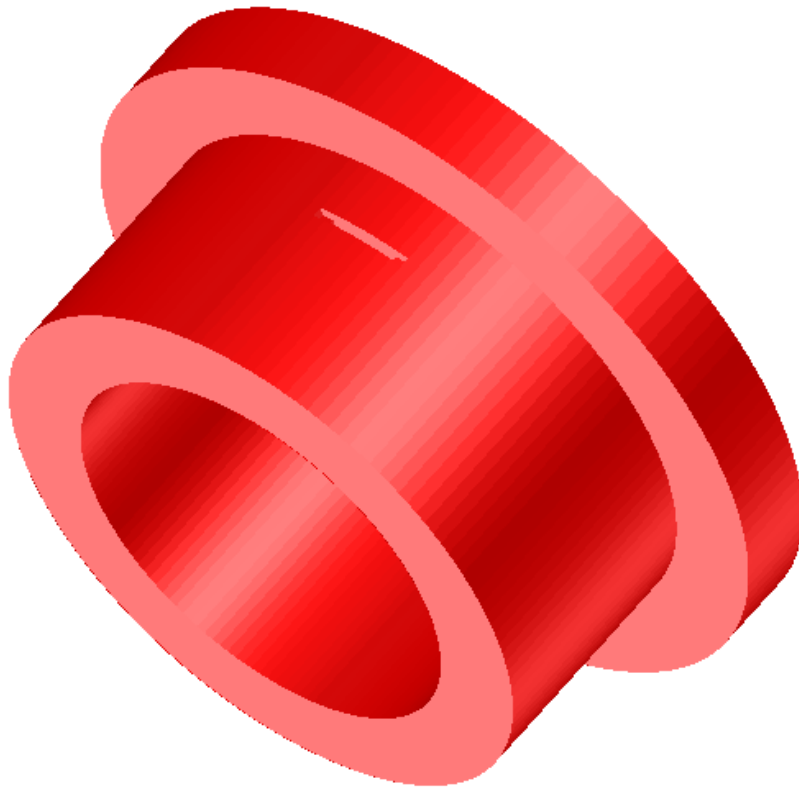


Figura 4. 113: Modelo detallado estado V (DFEM).

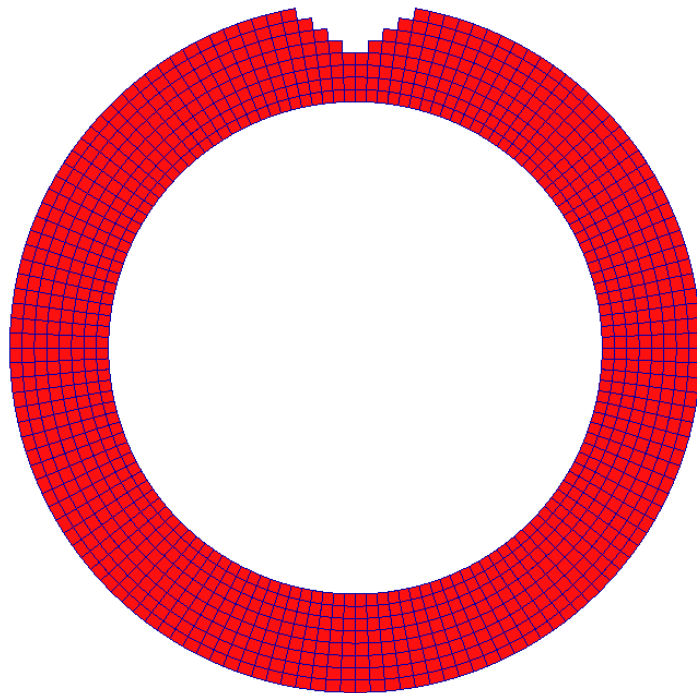


Figura 4. 114: Sección de análisis estado V (DFEM).

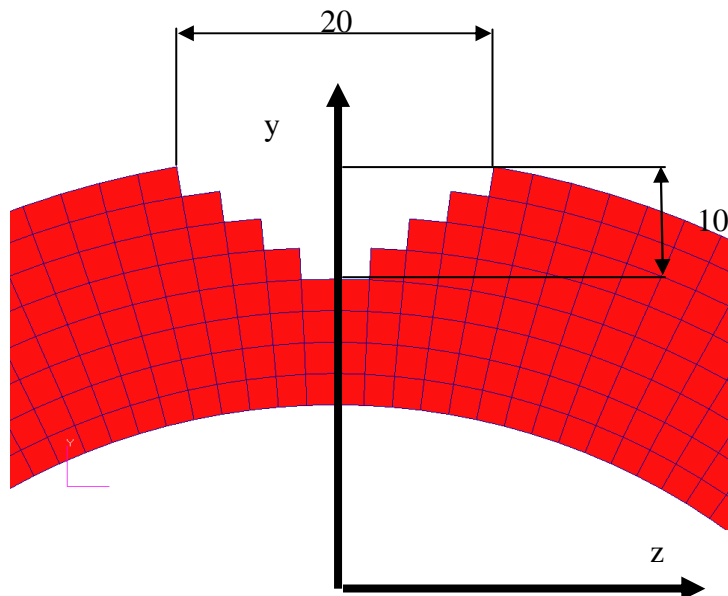


Figura 4. 115: Dimensiones grieta estado V (DFEM).

4.2.11.1 DEFORMACIÓN.

Vamos a sacar resultados de la deformada de la grieta y comparar la deformación en la superficie, con la deformación que aparece en la base de la fisura.

Para esto hemos sacado los desplazamientos de los nodos que forman los elementos que están en la superficie y de los nodos que forman los elementos del fondo de la grieta.

Primero se va a mostrar la deformada de la sección que se va a analizar.

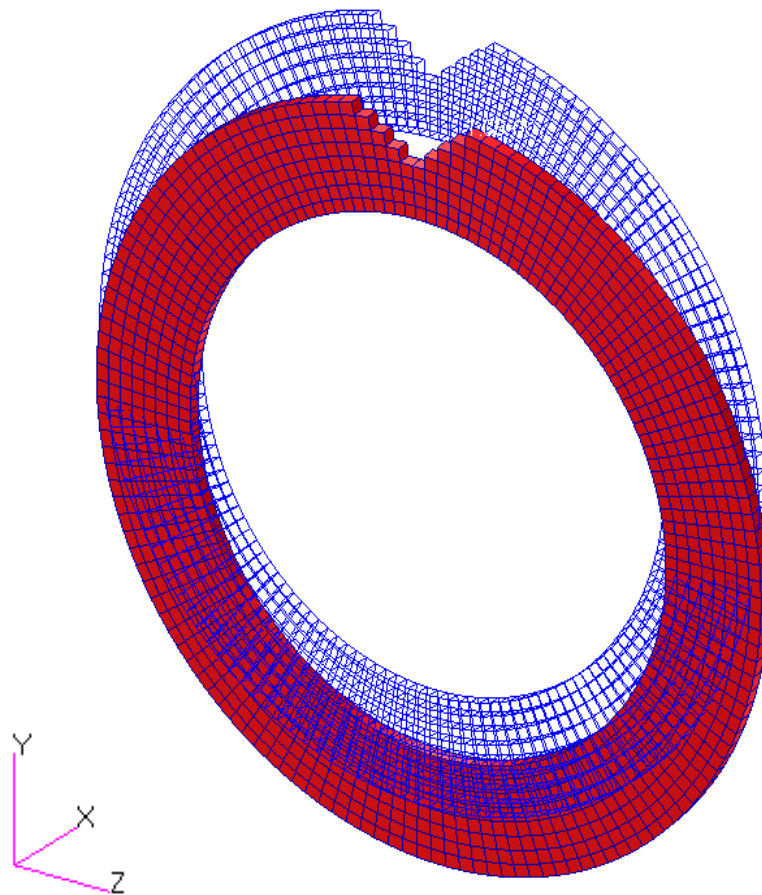


Figura 4. 116: Deformada grieta estado V, vista isométrica (DFEM).

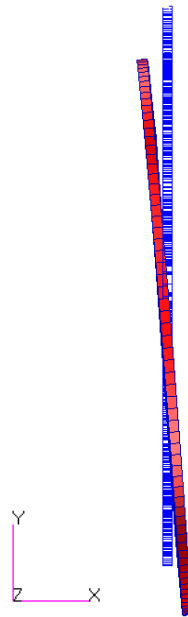


Figura 4. 117: Deformada grieta estado V, vista perfil (DFEM).

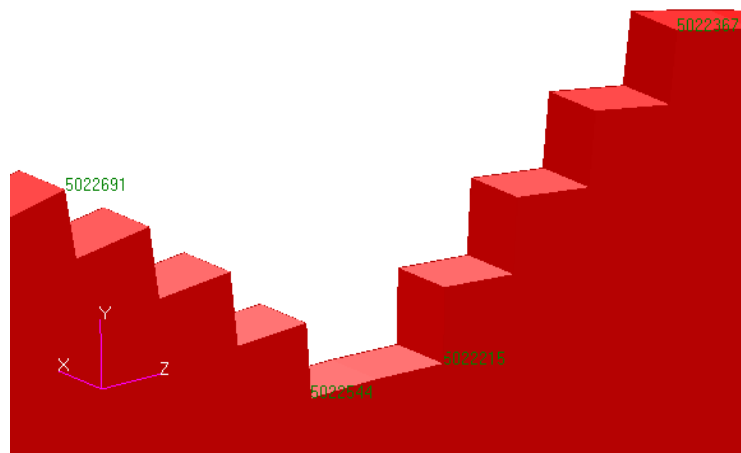


Figura 4. 118: Plot nodos grieta analizar estado V, vista perfil (DFEM).

Tabla 4. 10: Desplazamiento de los nodos, estado V (DFEM).

	Entity ID	Component		
		X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
superficie	5022691	-0.06005289	-0.12422955	0.00034656
	5022367	-0.06004737	-0.1242618	-0.0001093
fondo	5022215	-0.04965381	-0.12352837	0.00013691
	5022544	-0.04965591	-0.12352098	0.00008283

4.2.11.2 TENSIONES.

En la sección del modelo DFEM analizada en el estado V, se encuentra el siguiente nivel de tensiones de **von mises**:

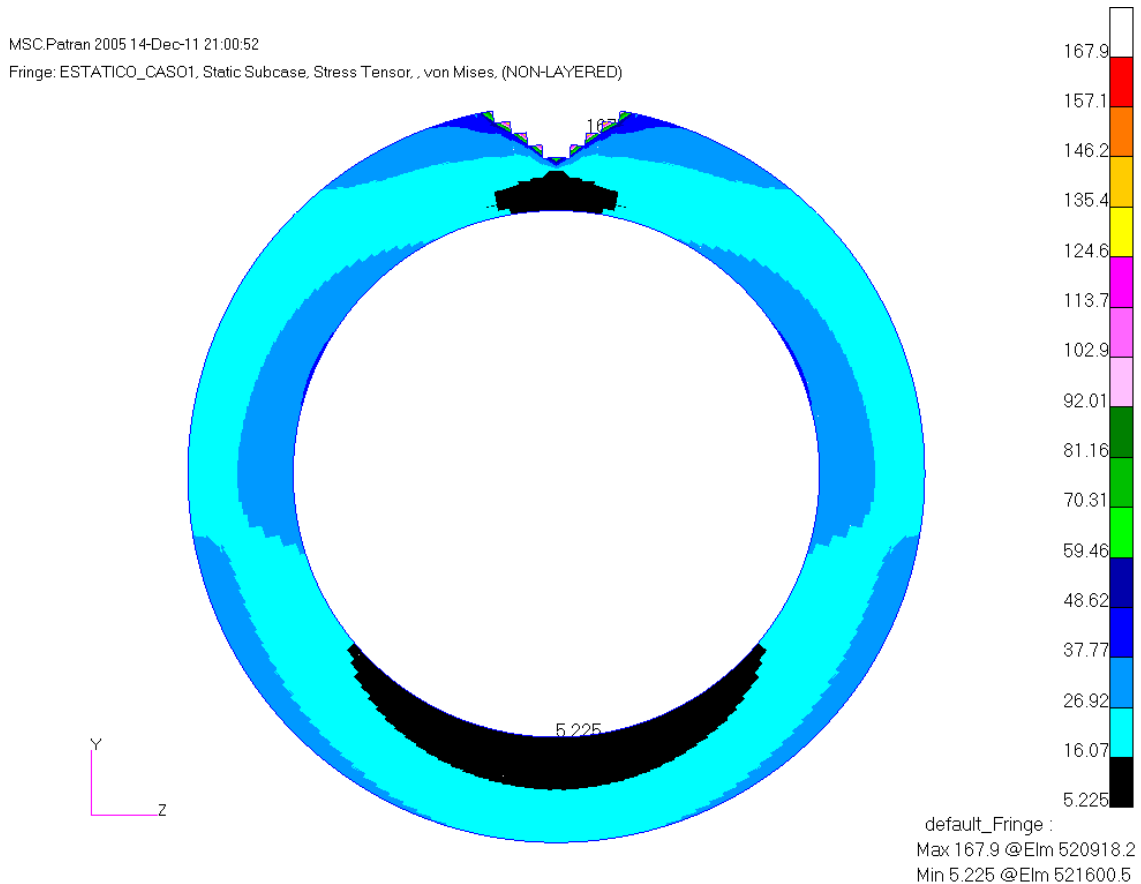


Figura 4. 119: Mapa de tensiones distribuidas sección crítica estado V (DFEM).

La máxima concentración de carga se da en los bordes libres del defecto de la superficie, ya que en estos vértices se acumularán todas las tensiones, como en el estado II.

El nivel de tensiones alrededor de la grieta se mantiene constante a un nivel de 48.62 MPa (rango azul oscuro) como se puede ver en el Plot de stress.

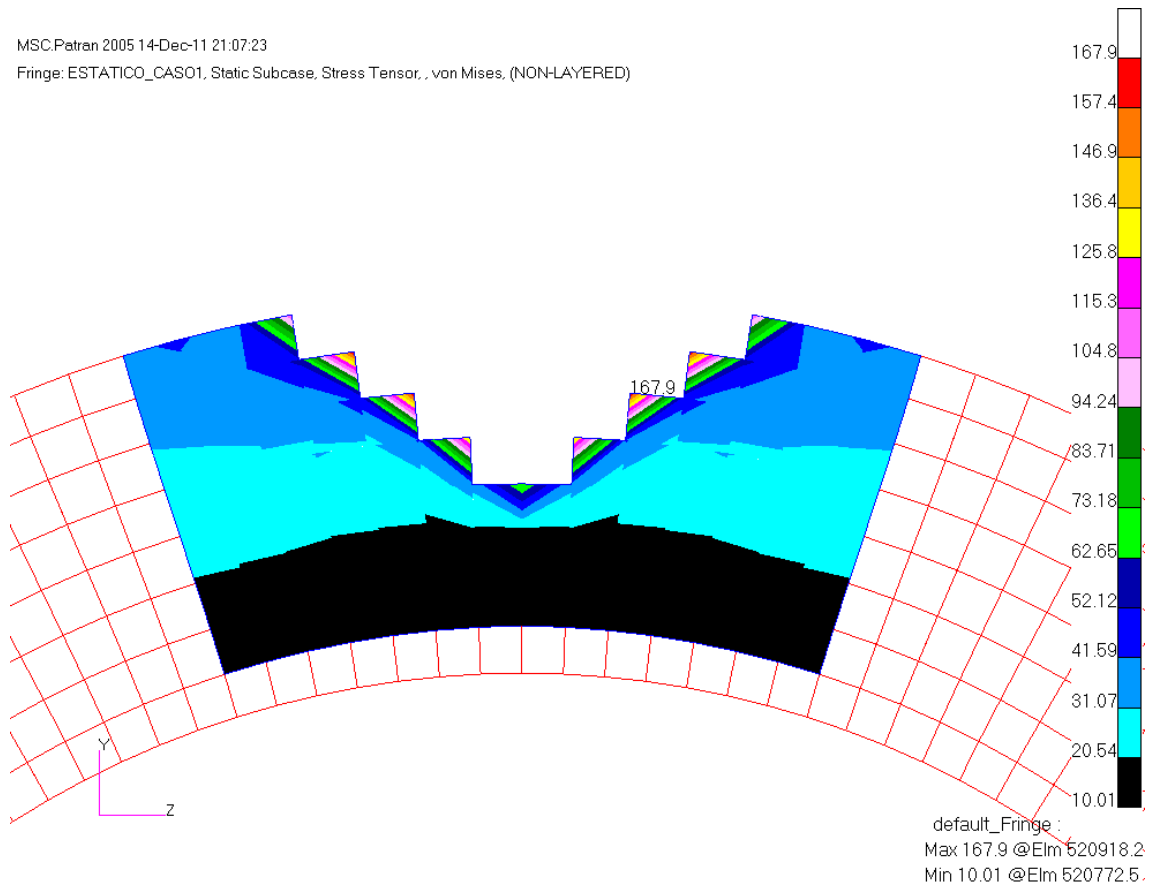


Figura 4. 120: Mapa de tensiones zona de la grieta estado V (DFEM).

La tensión máxima es de **167.9 MPa**.

Analizamos la evolución del **Factor de Reserva**:

$$RF = \frac{F_y}{\sigma_{ESTADO_V}} = \frac{1000MPa}{167.9MPa} = 5.95$$

4.2.11.3 MODOS PROPIOS.

Del estado V se han obtenido las siguientes frecuencias propias y sus respectivos modos propios:

Tabla 4. 11: Frecuencias propias para el estado V (DFEM).

MODE	CYCLES (Hz)
1	1.15E+04
2	1.15E+04
3	1.16E+04
4	1.16E+04
5	1.41E+04

A continuación se mostraran los Plot de los modos propios que aparecen en la tabla 4.11:

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 23:41:22

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11491., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11491., Eigenvectors, Translational,

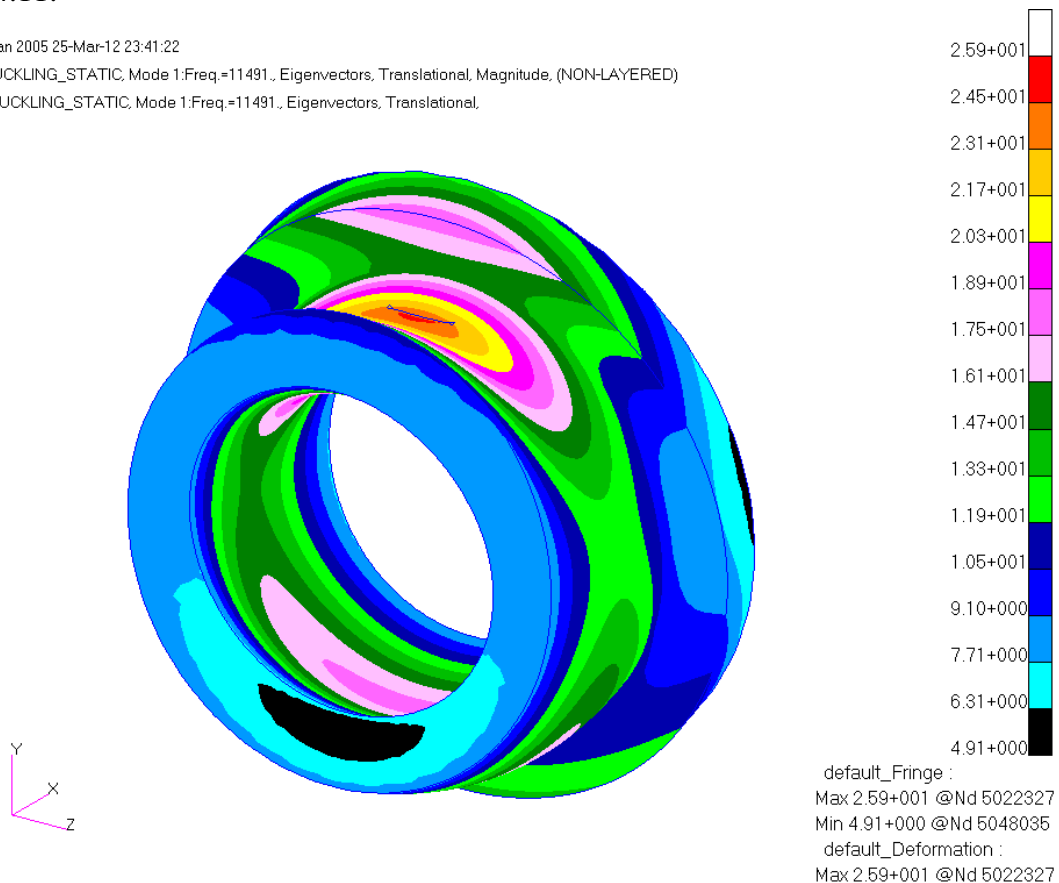


Figura 4. 121: Modo propio 1, estado V (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 23:41:58

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 2:Freq.=11508., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 2:Freq.=11508., Eigenvectors, Translational,

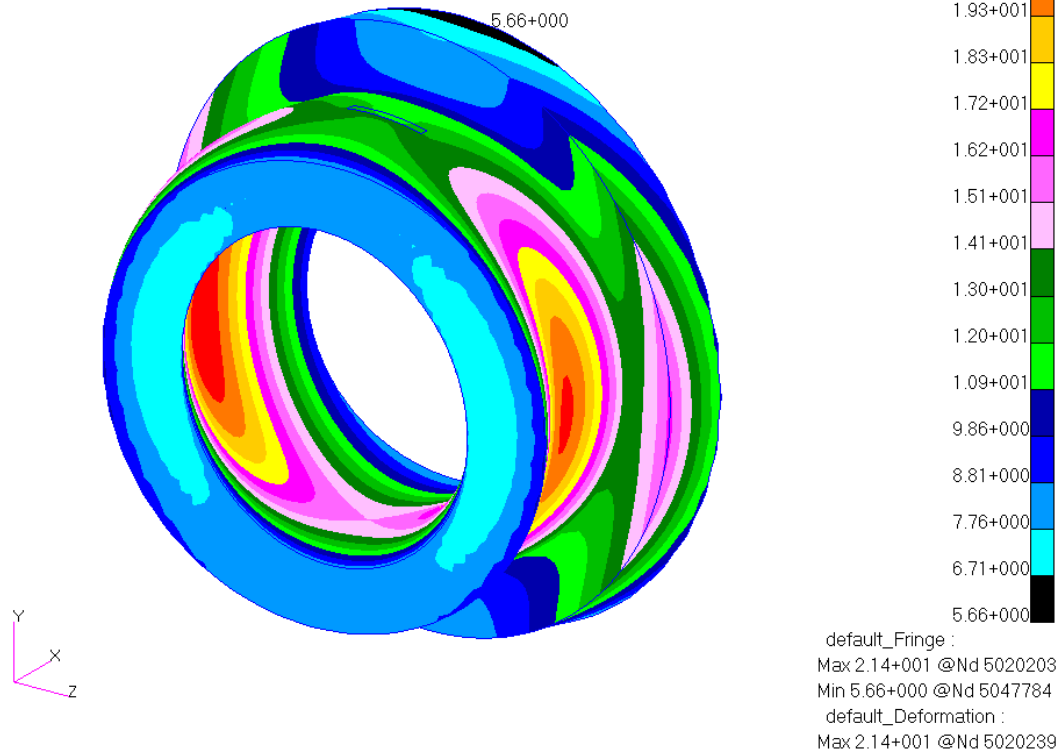


Figura 4. 122: Modo propio 2, estado V (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 23:43:03

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 3:Freq.=11606., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 3:Freq.=11606., Eigenvectors, Translational,

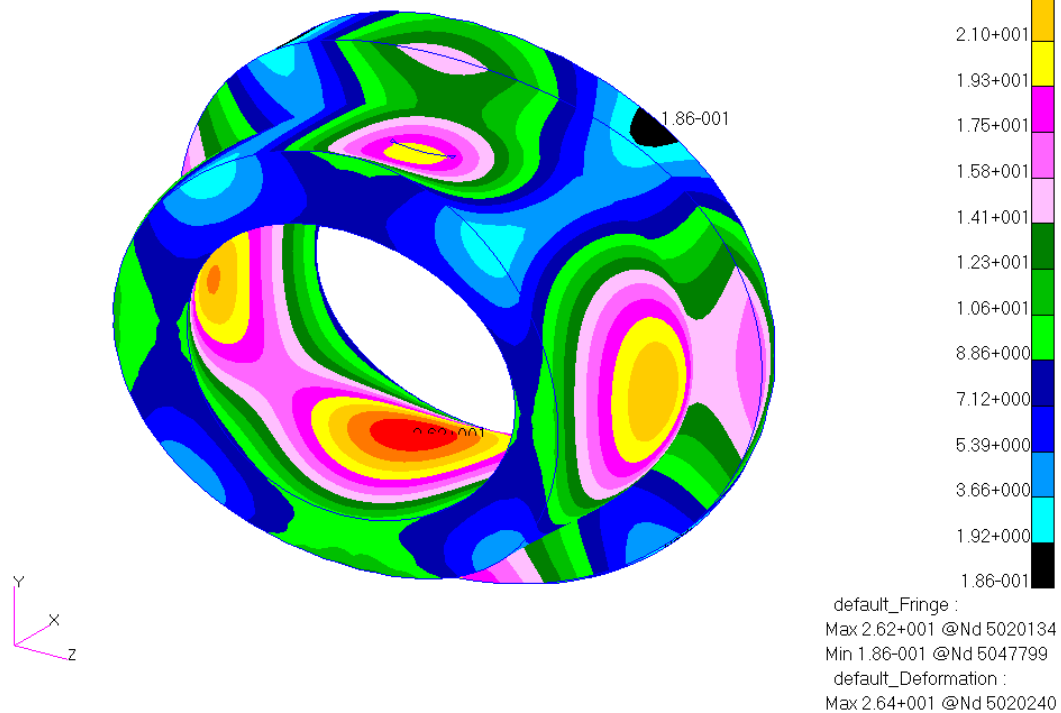


Figura 4. 123: Modo propio 3, estado V (DFEM).

MSC.Patren 2005 25-Mar-12 23:43:28

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 4:Freq.=11618., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 4:Freq.=11618., Eigenvectors, Translational,

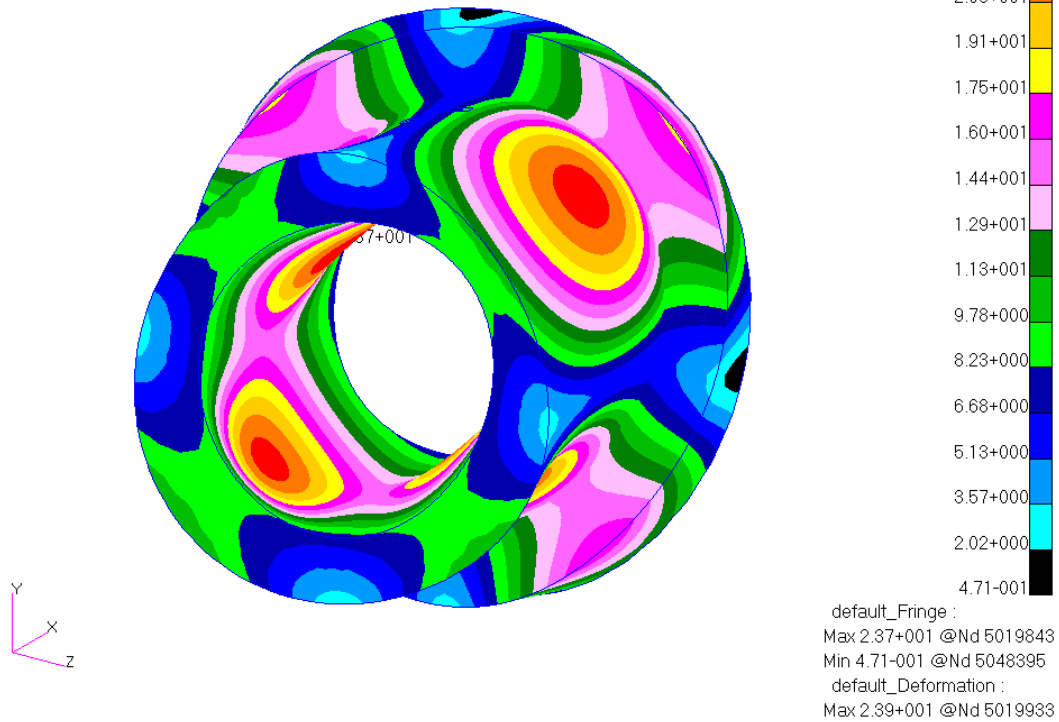


Figura 4. 124: Modo propio 4, estado V (DFEM).

MSC.Patren 2005 25-Mar-12 23:43:51

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 5:Freq.=14060., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 5:Freq.=14060., Eigenvectors, Translational,

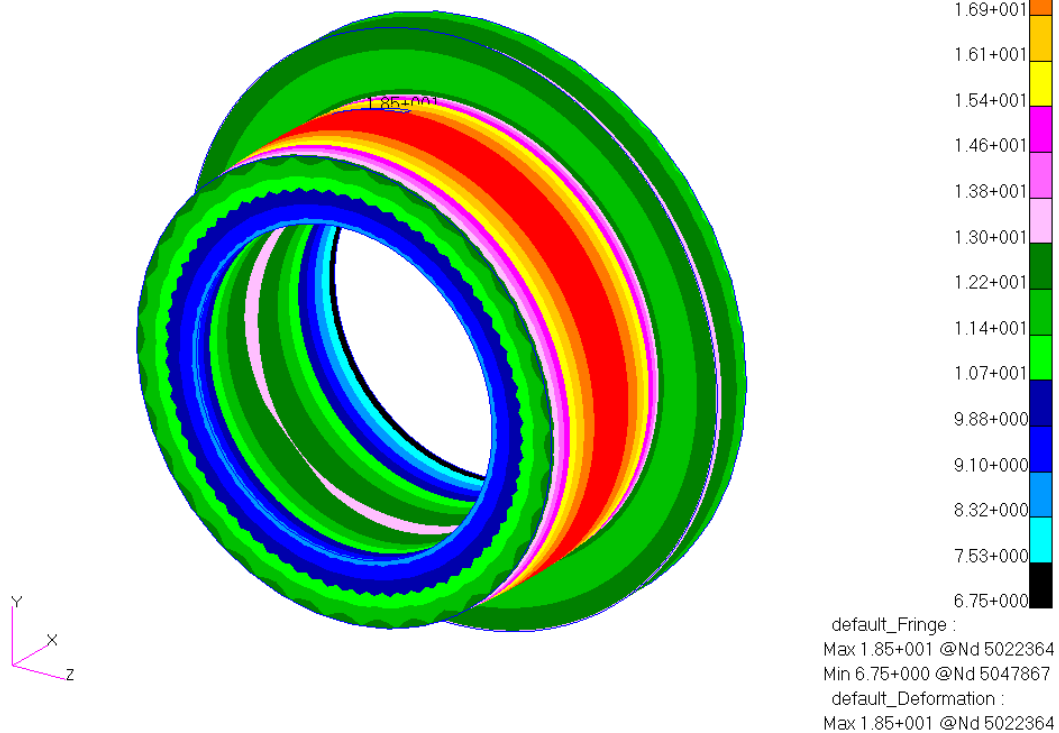


Figura 4. 125: Modo propio 5, estado V (DFEM).

4.2.12. RESULTADOS MODELO DETALLADO (DFEM).

4.2.12.1. DEFORMACIÓN.

A continuación se van a analizar los resultados obtenidos del análisis estático que se ha desarrollado para nuestros modelos detallados, en sus diferentes estados.

Para poder comparar la deformación en la superficie con la del fondo de la grieta se obtienen resultados de los nodos que se encuentran en las esquinas de los elementos que delimitan y dimensionan nuestra grieta, superficie y fondo, se han extraído sus componentes de desplazamiento, con estos desplazamientos podremos evaluar la deformación que existe en la superficie de la grieta y del fondo de la fisura, estos desplazamientos están referenciados al sistema de análisis 8701.

Para nuestro análisis se eligieron los dos nodos simétricos tanto en el fondo como en la superficie. Se puede observar que se comportan simétricamente y se deforman igual. Por eso para nuestro análisis se han utilizado los nodos de un lado, como se puede ver en las siguientes tablas.

Tabla 4. 12: Componentes desplazamiento superficie de la grietas (DFEM).

Superficie					
Entity ID	ESTADO	Ancho grieta (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
5022688	II	2.5	-0.06070149	-0.1249757	0.00016524
5022689	III	5	-0.06062782	-0.12478668	0.00024271
5022690	IV	7.5	-0.06040174	-0.12453394	0.00030499
5022691	V	10	-0.06005289	-0.12422955	0.00034656

Tabla 4. 13: Componentes desplazamiento fondo de la grietas (DFEM).

Fondo					
Entity ID	ESTADO	Ancho grieta (mm)	X (mm)	Y (mm)	Z (mm)
5022652	II	2.5	-0.05773766	-0.12479471	0.00019343
5022616	III	5	-0.0549998	-0.12439688	0.00016295
5022580	IV	7.5	-0.05231339	-0.12397674	0.00012393
5022544	V	10	-0.04965591	-0.12352098	0.00008283

El estado I como es el inicial y no tiene ninguna fisura, no tiene sentido que se analicen sus desplazamientos en la superficie. En el Plot de la figura 4.66 se puede observar el desplazamiento máximo de la sección.

A continuación se mostrará las gráficas obtenidas con los datos de las tablas anteriores: tabla 4.12 y 4.13.

Componente “X”:

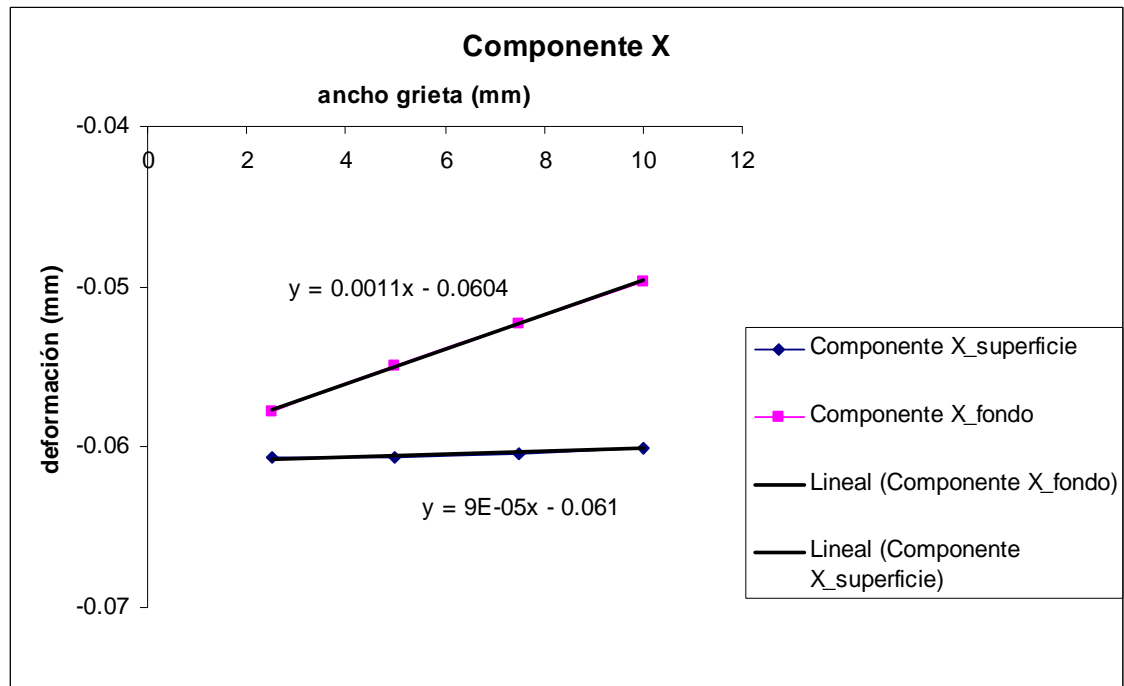


Figura 4. 126: Desplazamiento componente X de la grieta (DFEM).

Componente “Y”:

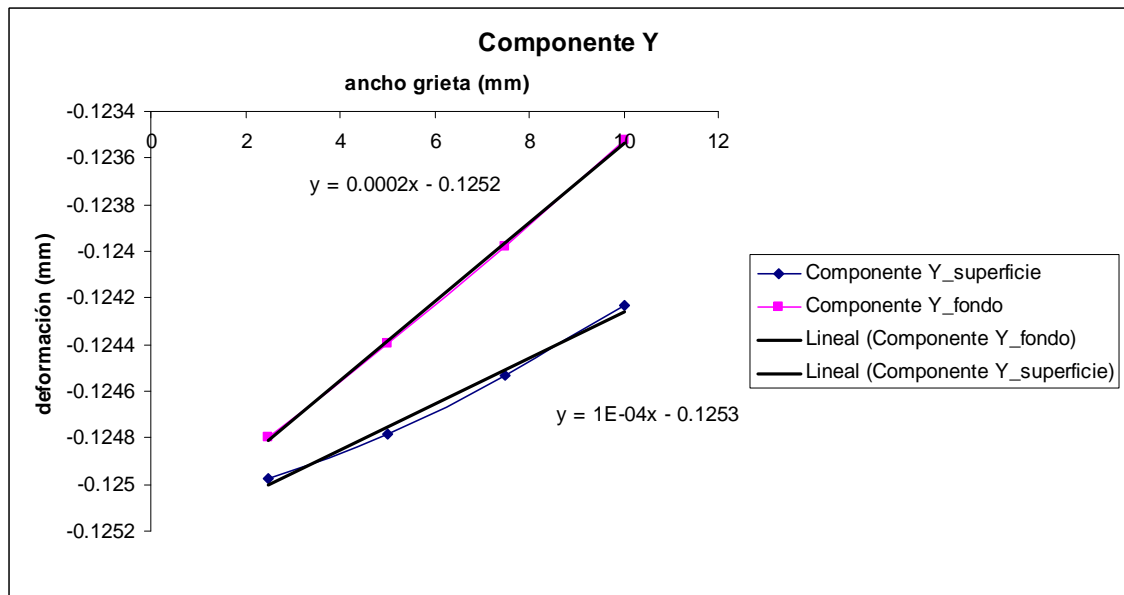


Figura 4. 127: Desplazamiento componente Y de los nodos (DFEM).

Componente “Z”:

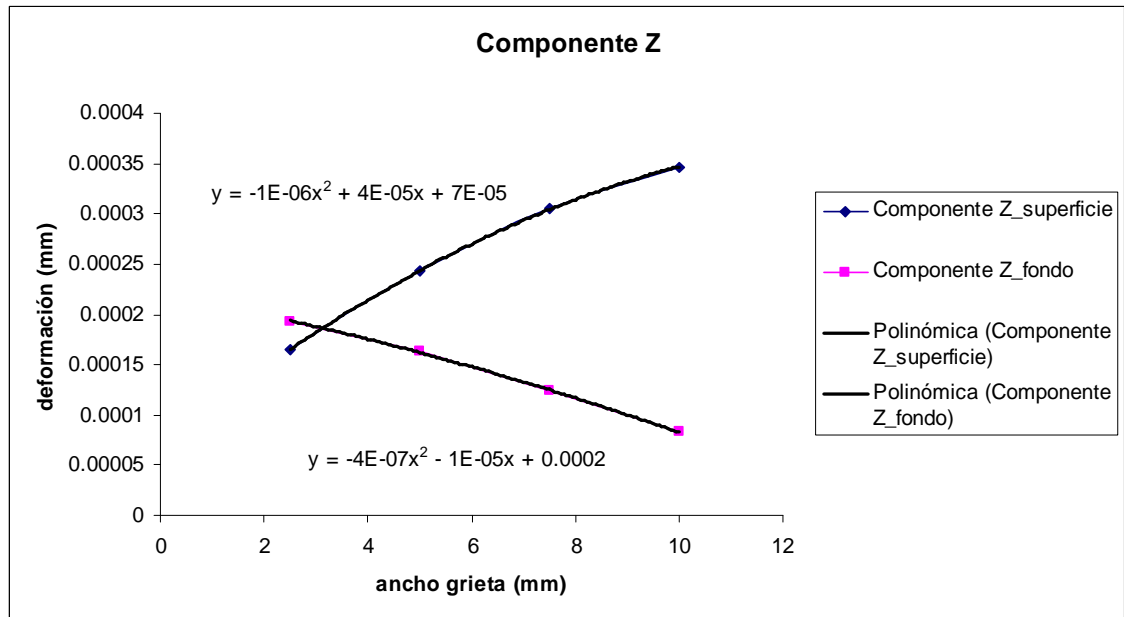


Figura 4. 128: Desplazamiento componente Z de los nodos (DFEM).

La mayor deformación se la lleva la componente Y, según nuestro sistema de coordenadas 8701 es la componente de cortadura.

En las gráficas anteriores se puede observar que para el mismo estado, la deformación en la superficie de la grieta es mayor que en el fondo de la fisura. Además se puede observar que se acercan a una función lineal, cuyas pendientes en la superficie son mayores que las del fondo. Pero hay que decir que la deformación es inversamente proporcional al tamaño de la grieta, es decir, que cuanto más grande es la grieta menos se deforman sus extremos, menos en el caso de la componente Z, que además de crecer en función de la grieta, la función que se le acerca es una NO lineal. Por lo que el tamaño de la grieta influye en la deformación.

El siguiente paso es el de analizar y comparar las componentes por separado.

En las siguientes tablas y gráficos se van a comparar las componentes por separado para evaluar como evolucionan cada una en función del tamaño de la grieta.

Tabla 4. 14: Comparativa componte X desplazamiento de la grieta (DFEM).

	superficie		fondo	
ESTADO	Entity ID	X (mm)	Entity ID	X (mm)
II	5022688	-0.06070149	5022652	-0.05773766
III	5022689	-0.06062782	5022616	-0.0549998
IV	5022690	-0.06040174	5022580	-0.05231339
V	5022691	-0.06005289	5022544	-0.04965591

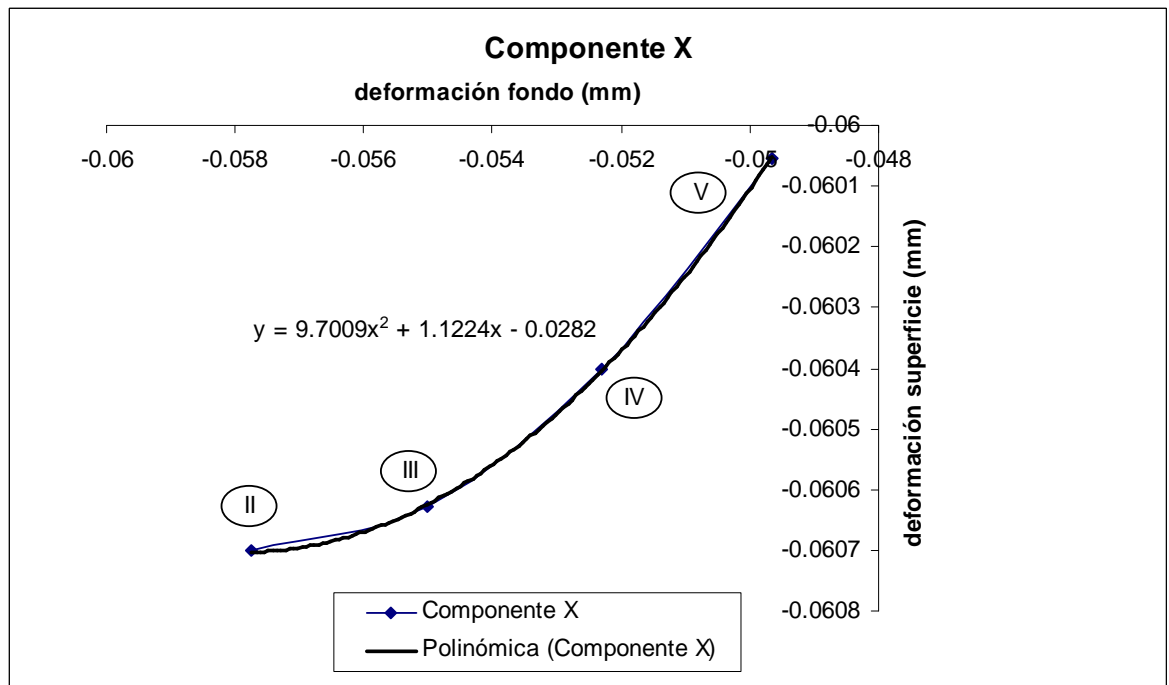


Figura 4. 129: Comparativa componte X desplazamiento de la grieta (DFEM).

Se puede observar la evolución No lineal de la deformación.

Tabla 4. 15: Comparativa componte Y desplazamiento de la grieta (DFEM).

superficie		fondo	
Entity ID	Y (mm)	Entity ID	Y (mm)
5022688	-0.1249757	5022652	-0.12479471
5022689	-0.12478668	5022616	-0.12439688
5022690	-0.12453394	5022580	-0.12397674
5022691	-0.12422955	5022544	-0.12352098

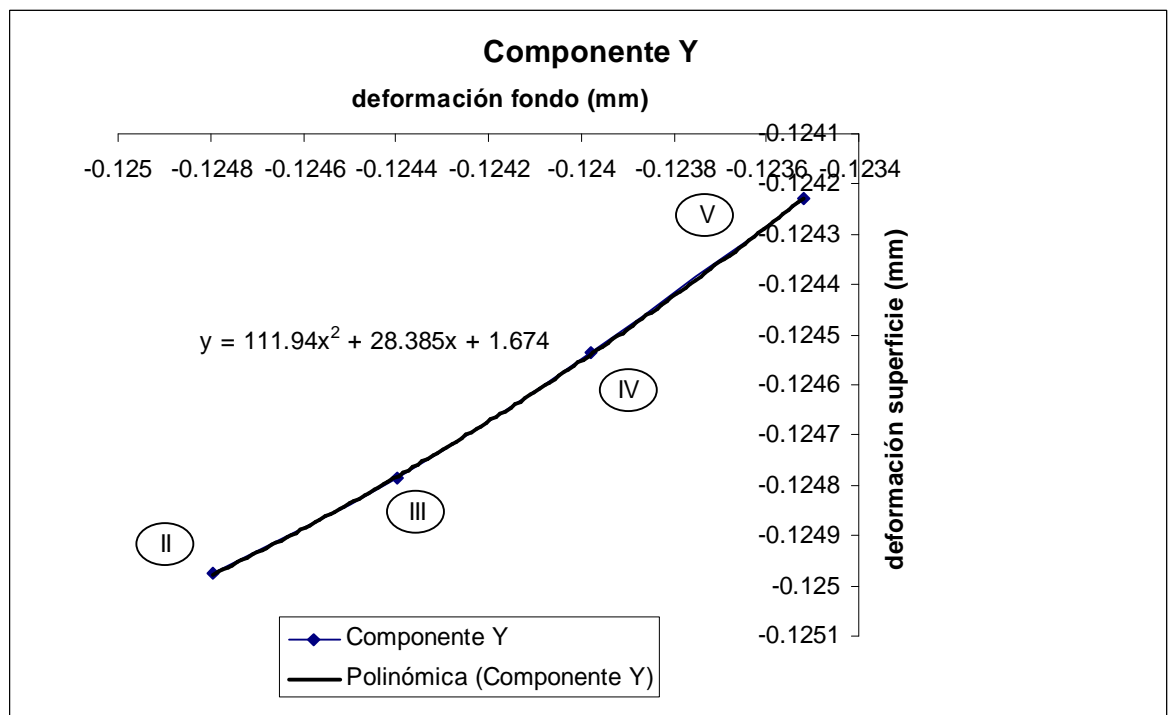


Figura 4. 130: Comparativa componte Y desplazamiento de la grieta (DFEM).

Se comporta como la componente X, la función que se le acerca es No lineal.

Tabla 4. 16: Comparativa componte Z desplazamiento de la grieta (DFEM).

ESTADO	superficie		fondo	
	Entity ID	Z (mm)	Entity ID	Z (mm)
II	5022688	0.00016524	5022652	0.00019343
III	5022689	0.00024271	5022616	0.00016295
IV	5022690	0.00030499	5022580	0.00012393
V	5022691	0.00034656	5022544	0.00008283

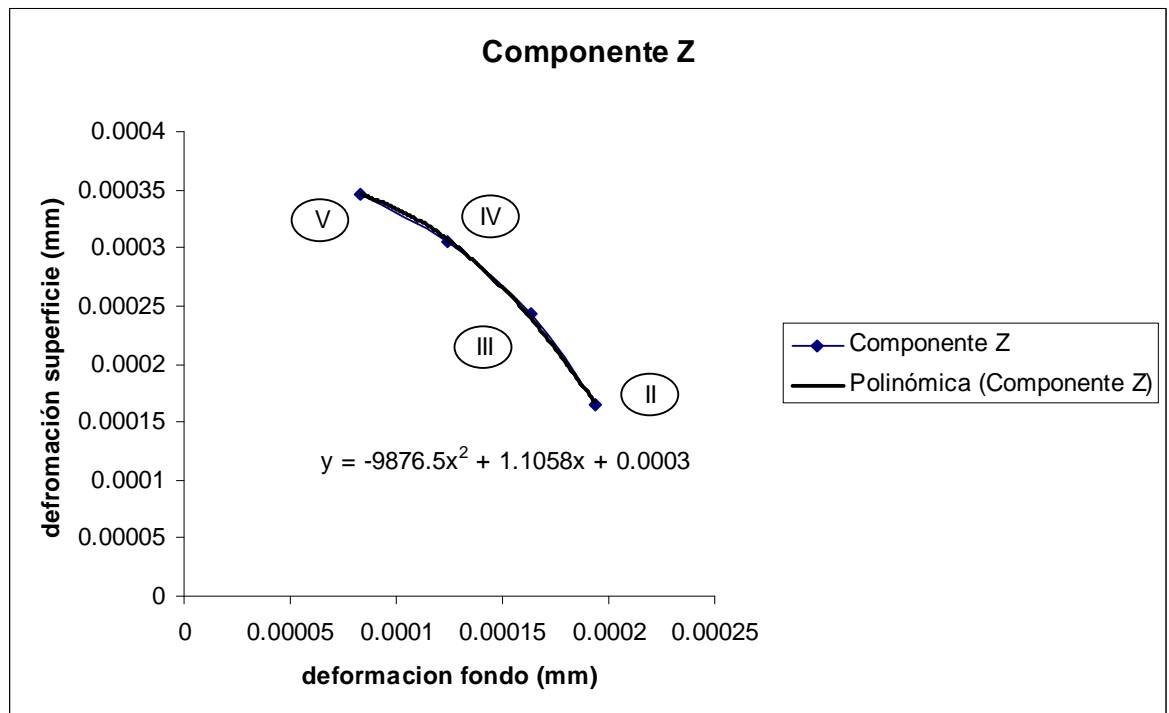


Figura 4. 131: Comparativa componte Z desplazamiento de la grieta (DFEM).

Se puede observar el decrecimiento que sufre la componente Z al crecer la grieta, en el fondo de la grieta, en cambio en la superficie crece la deformación.

4.2.12.2. TENSIONES.

Conocido el nivel de tensión en la superficie de la grieta vamos a intentar sacar una relación entre la tensión y el crecimiento de la profundidad de la grieta, con las condiciones de carga y restricciones de movimiento planteadas en esta memoria.

Tabla 4. 17: Resultados análisis (DFEM).

	profundidad (mm)	stress (MPa)
Estado II	2.5	82.9
Estado III	5	128.7
Estado IV	7.5	152.2

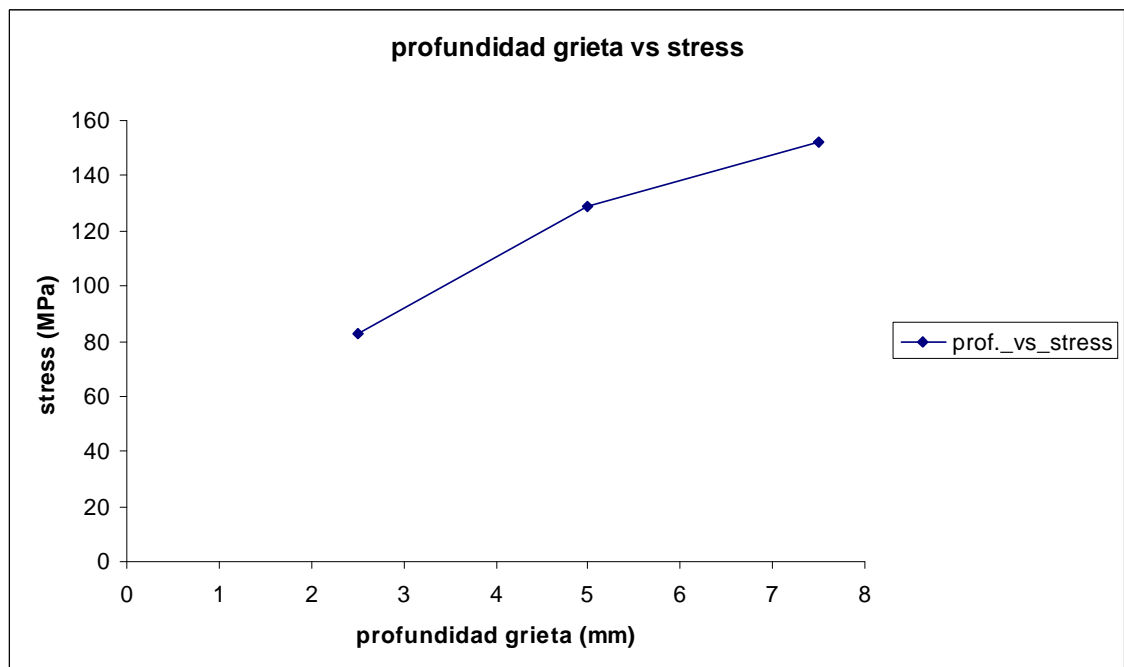


Figura 4. 132: Diagrama tensión-profundidad grieta modelo detallado (DFEM).

A nuestro gráfico añadiremos una línea de tendencia, para así intentar averiguar como influye el aumento de la profundidad de la grieta a la distribución de las tensiones alrededor del defecto.

La primera línea de tendencia que probaremos es la **lineal**, como se puede ver en la siguiente figura:

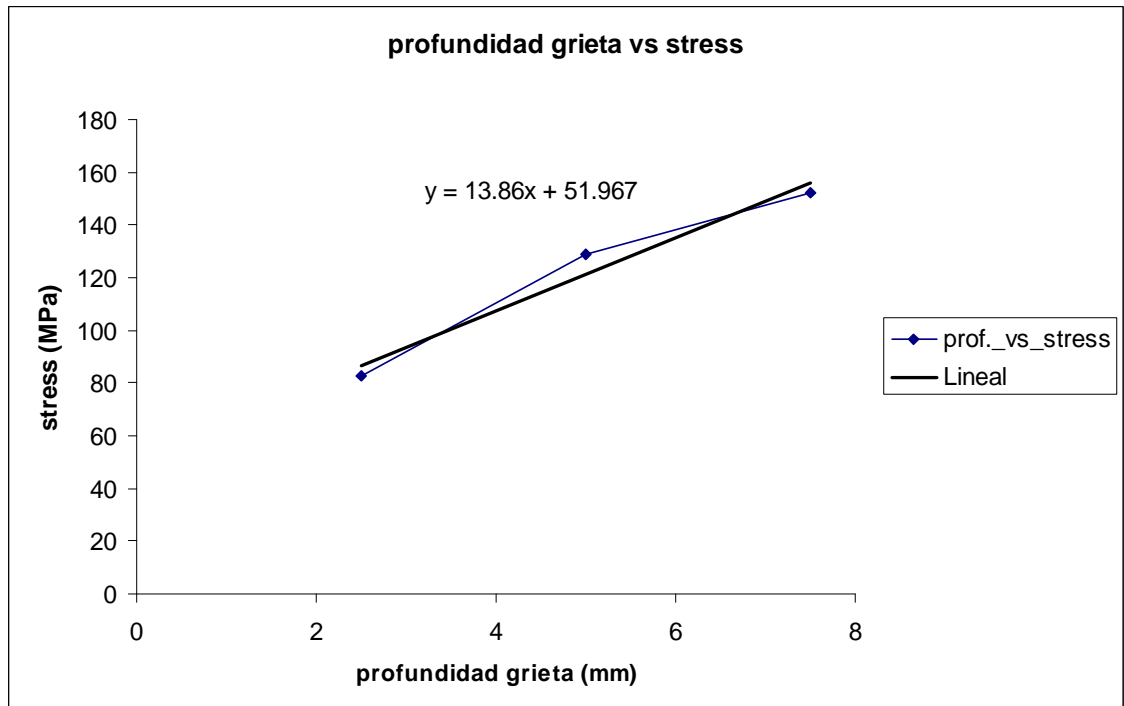


Figura 4. 133: Diagrama tensión-profundidad con tendencia LINEAL (DFEM).

La ecuación de tendencia es:

$$y = 13.9 \cdot X + 52$$

Donde:

X = la profundidad de la grieta (mm).

Y = es el nivel de tensiones máximo que aparecería alrededor de la grieta (MPa).

La segunda línea de tendencia que probaremos con una **no lineal**, como se puede ver en la siguiente figura:

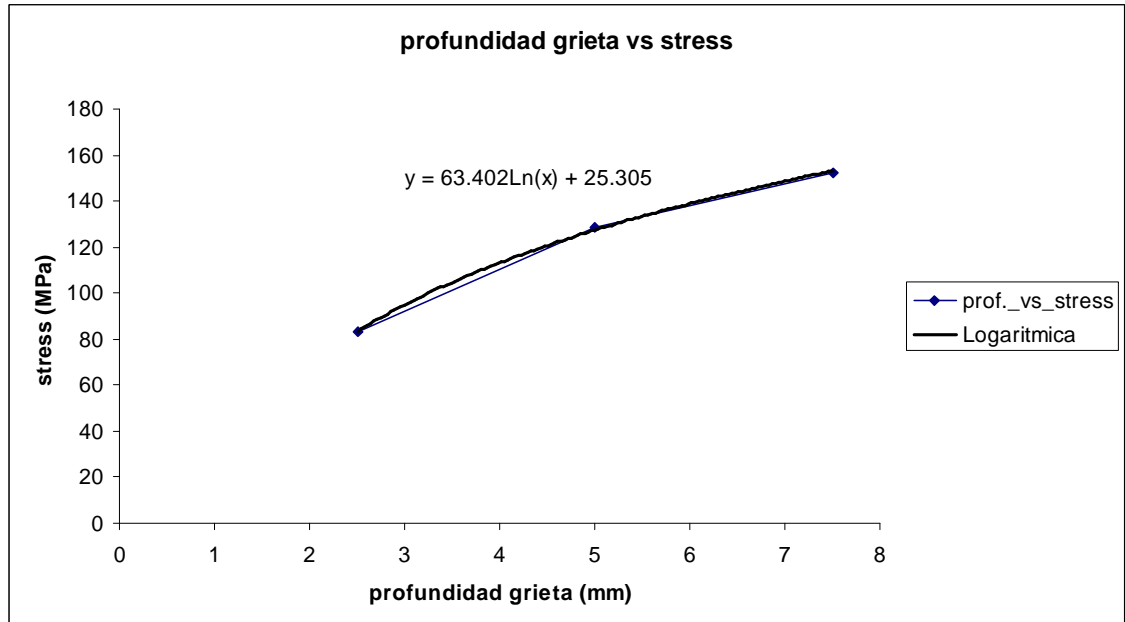


Figura 4. 134: Diagrama tensión-profundidad con tendencia NO LINEAL (DFEM).

La ecuación de tendencia es:

$$y = 63.4 \cdot \ln(X) + 25.3$$

Donde:

X = la profundidad de la grieta (mm).

Y = es el nivel de tensiones máximo que aparecería alrededor de la grieta (MPa).

Se puede observar que la línea que más se adapta a la curva es la logarítmica, para averiguar cual es la más exacta se va a desarrollar el último estado (V) con una profundidad de grieta de 10 mm.



Vamos a comparar este valor obtenido en el Plot de tensiones del ESTADO V (ver figura 4.120) con el resultado que obtendríamos de las graficas anteriores.

Tendencia lineal

Donde:

$$X = 10 \text{ mm}$$

$$y = 13.9 \cdot X + 52 = 13.9 \cdot (10) + 52 = 191 \text{ MPa}$$

Ratio

$$R = \frac{\sigma_{Lineal}}{\sigma_{Nastran}} = \frac{191}{167.9} = 1.14$$

Tendencia no lineal

Donde:

$$X = 10 \text{ mm}$$

$$y = 63.4 \cdot \ln(X) + 25.3 = 63.4 \cdot \ln(10) + 25.3 = 171.3 \text{ MPa}$$

Ratio

$$R = \frac{\sigma_{NoLineal}}{\sigma_{Nastran}} = \frac{171.3}{167.9} = 1.02$$

Concluimos que se puede observar como aparece una mayor concentración de tensiones en la superficie de las grietas (ver figuras 4.81; 4.94; 4.107; 4.120) y un crecimiento de éstas. Al mismo tiempo la grieta se va profundizando en la pieza. Este crecimiento hemos podido observar que **no es Lineal**.

Podemos resumir que la distribución de tensiones alrededor de la grieta, evoluciona No linealmente, ya que es el resultado que más se le acerca al resultado real.

Al mismo tiempo se observa que las tensiones alrededor del defecto se mantienen constantes, por lo que deducimos que son una concentración de tensiones no relevantes que posiblemente aparezcan por la modelización del defecto.

Además se observa que el resultado teórico es conservador por lo que nos da un margen de seguridad para futuros estudios para otros nuevos estados de nuestra pieza.

4.2.12.3. MODALES.

A continuación mostraremos una tabla resumen con los resultados de los análisis modales, desarrollados en los capítulos anteriores.

Tabla 4. 18: Resumen frecuencia (DFEM).

FRECUENCIAS (Hz)					
MODE	ESTADO I	ESTADO II	ESTADO III	ESTADO IV	ESTADO V
1	1.15E+04	1.15E+04	1.15E+04	1.15E+04	1.15E+04
2	1.15E+04	1.15E+04	1.15E+04	1.15E+04	1.15E+04
3	1.16E+04	1.16E+04	1.16E+04	1.16E+04	1.16E+04
4	1.16E+04	1.16E+04	1.16E+04	1.16E+04	1.16E+04
5	1.41E+04	1.41E+04	1.41E+04	1.41E+04	1.41E+04

Se puede observar que todas las frecuencias coinciden, pero existe una variación en el primer modo de vibración.

El estado I, modelo que no tiene ningún defecto en la superficie, se comporta diferente que el resto de configuraciones, como se puede ver en las figuras anteriores.

A continuación vamos a mostrar un resumen de la variación encontrada, se van a mostrar el primer modo de las diferentes configuraciones y para la frecuencia **11507 Hz** y para todos los estados.

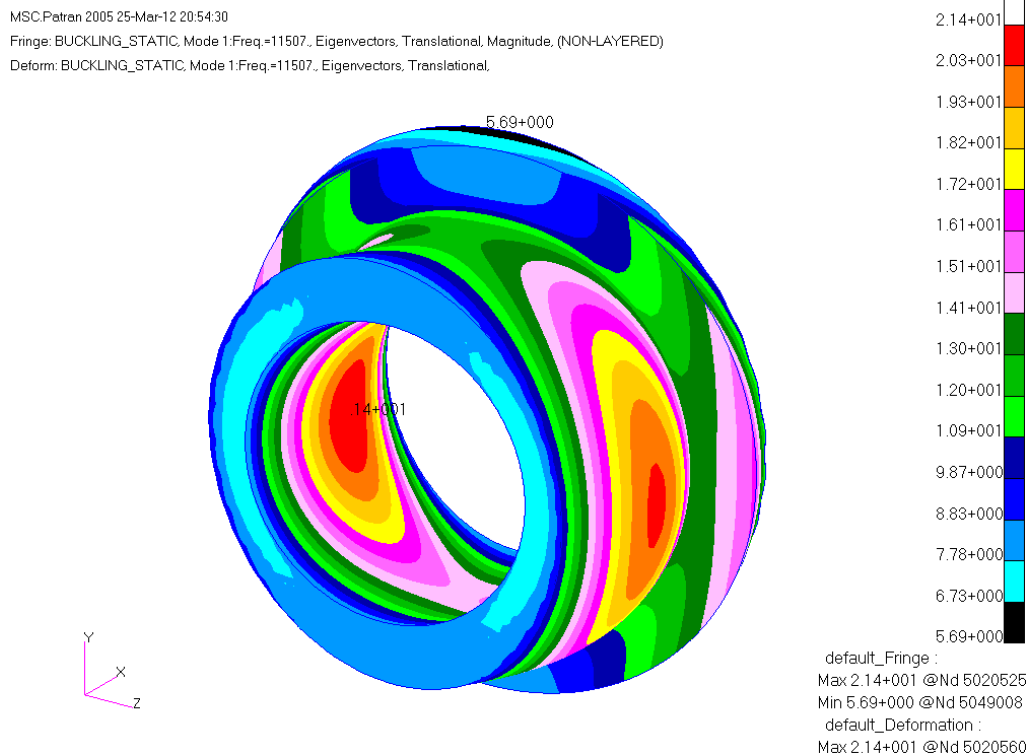


Figura 4. 135: Modo propio 1, estado I (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 21:32:58

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11507., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11507., Eigenvectors, Translational.

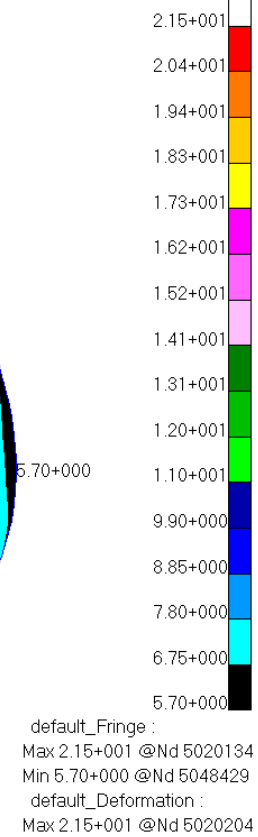
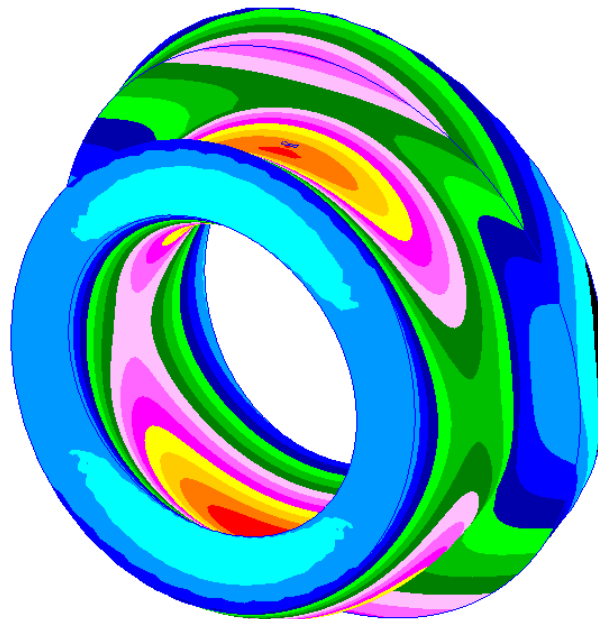


Figura 4. 136: Modo propio 1, estado II (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 22:16:12

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11504., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11504., Eigenvectors, Translational.

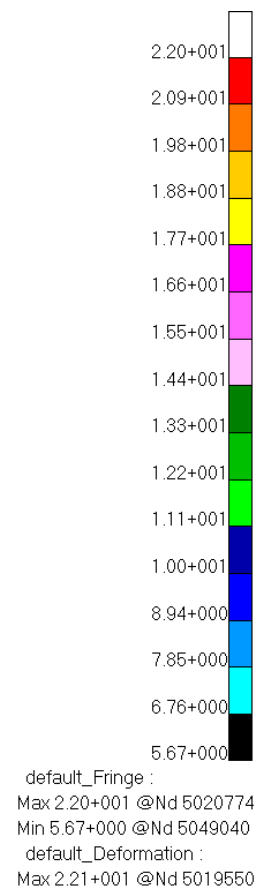
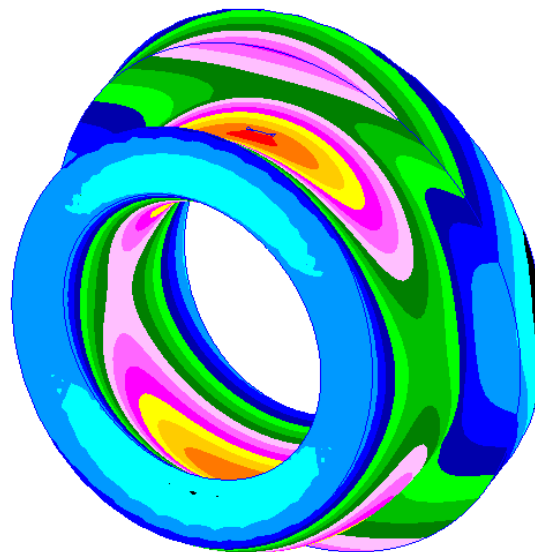
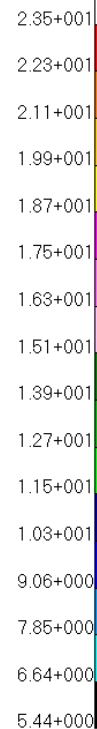
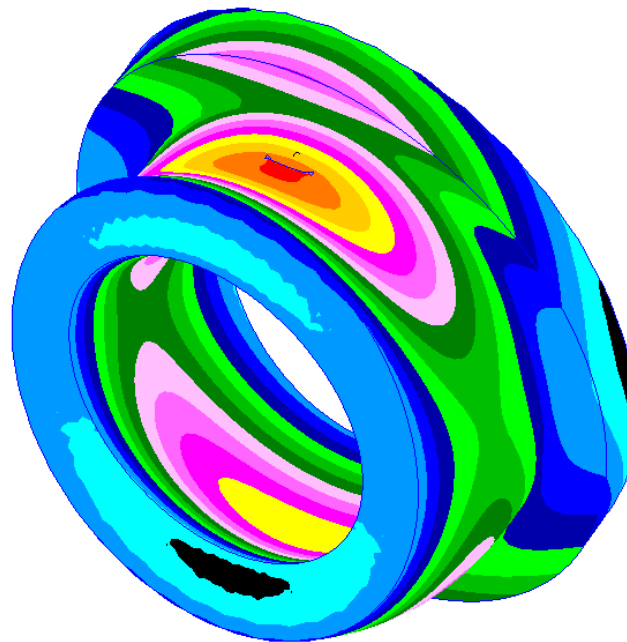


Figura 4. 137: Modo propio 1, estado III (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 23:22:52

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11499., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11499., Eigenvectors, Translational.



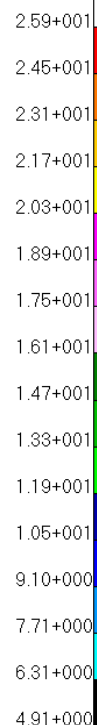
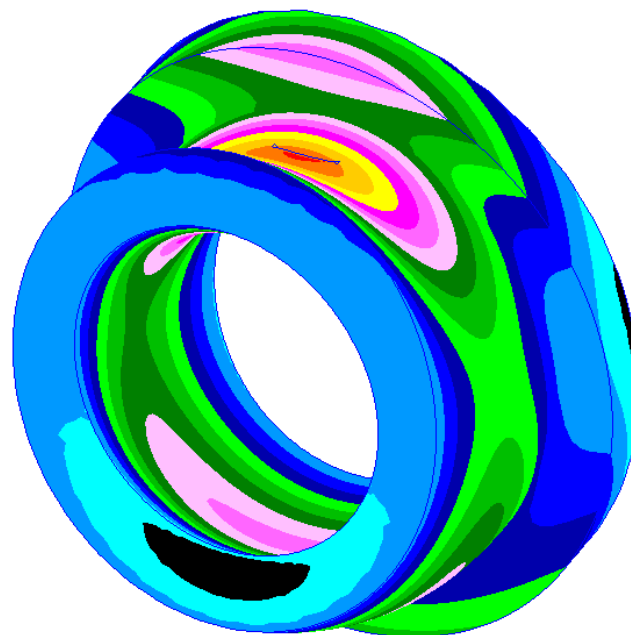
default_Fringe :
Max 2.35+001 @Nd 5022364
Min 5.44+000 @Nd 5048035
default_Deformation :
Max 2.35+001 @Nd 5022364

Figura 4. 138: Modo propio 1, estado IV (DFEM).

MSC.Patran 2005 25-Mar-12 23:41:22

Fringe: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11491., Eigenvectors, Translational, Magnitude, (NON-LAYERED)

Deform: BUCKLING_STATIC, Mode 1:Freq.=11491., Eigenvectors, Translational.



default_Fringe :
Max 2.59+001 @Nd 5022327
Min 4.91+000 @Nd 5048035
default_Deformation :
Max 2.59+001 @Nd 5022327

Figura 4. 139: Modo propio 1, estado V (DFEM).



5. CONCLUSIONES.

A lo largo del proyecto se ha intentado explicar el proceso que se debería llevar a cabo para poder desarrollar un análisis detallado, y como extraer la información necesaria para comprender el comportamiento de una zona concreta de una pieza o conjunto de ellas, partiendo inicialmente de un plano 2D. Gracias a estos modernos programas de cálculo podemos extraer numerosa información del comportamiento de nuestros componentes, sacándoles el máximo rendimiento a un coste mínimo, ya que no se tiene que fabricar ningún prototipo para ensayar por lo que se reduce el coste de diseño.

Hay que recalcar dentro del desarrollo del estudio, que gracias al método de **desplazamientos forzados**, hemos sido capaces de reproducir el estado de carga en una zona concreta de un modelo GLOBAL, zona del modelo que se necesitaba hacer un estudio detallado. Como puede ser un defecto en la superficie de dimensiones ínfimas comparadas con el tamaño de la pieza global a estudiar, como pueden ser defectos internos en la forja del material, etc.

En el capítulo de resultados (4.2.12) se explica los resultados obtenidos a través del análisis desarrollado con código Nastran, a continuación se realizara una serie de comentarios sobre los resultados, que orientara sobre el comportamiento mecánico que tiene nuestra pieza según vaya modificándose su estado estructural.

- Deformación (capítulo 4.2.12.1); se puede observar que el fondo de la grieta se deforma menos que la superficie pero al aumentar el tamaño de la grieta su deformada tiene comportamiento lineal.
- Tensiones (capítulo 4.2.12.2); a diferencia de la deformación que tiende a un comportamiento lineal las tensiones muestran una tendencia no lineal, al aumentar el tamaño de la grieta, esto es debido a las hipótesis utilizadas para desarrollar el análisis.
- Modal (capítulo 4.2.12.3); se puede observar un detalle en el análisis modal de nuestro modelo detallado, las frecuencias propias no varían en nuestro sistema al cambiar el estado del modelo detallado pero se observa un cambio entre el modelo inicial (sin defecto superficial) y el resto de estados (con defecto superficial) en el primer modo propio de vibración, ver figuras (4.135 hasta la 4.139), se deberá realizar un estudio más exhaustivo debido a que la pérdida de masa por la aparición de estos defectos no deberían ser influyentes en el comportamiento modal del modelo.

Los resultados obtenidos pueden variar debido a las hipótesis utilizadas en el desarrollo del análisis, pero como se ha comentado en apartados anteriores esta memoria está elaborada para mostrar la metodología a seguir para desarrollar un análisis del comportamiento de un eje fisurado a través de código NASTRAN.



Estos métodos de análisis por elementos finitos nos dan la oportunidad de desarrollar numerosos **trabajos futuros**, gracias al modelo global que nos da una idea del comportamiento del sistema en la realidad y con los **desplazamientos forzados** podríamos estudiar cualquier parte del sistema detalladamente, como pueden ser:

- Recalcular la zona afectada con un nuevo estado de carga.
- Estudiar números defectos superficiales como internos en zonas localizadas y con un tamaño de un orden de magnitud muy inferior al diseño del modelo Global.
- Representar el comportamiento de la realidad de zonas muy localizadas en el modelo Global.
- Profundizar más en la modelización de los diferentes elementos.
- Realizar estudios más detallados para desarrollar un análisis que representa aun más la realidad.
- Estudiar diferentes zonas del modelo para conocer su comportamiento mecánico al aparecer defectos superficiales.



6. ESTUDIO ECONÓMICO.

Para conseguir un presupuesto lo más aproximado posible a la realidad se han de tener en cuenta una serie de premisas:

- La amortización de los software utilizados; las licencias de estos programas se pagan anualmente (365 días al año) por lo que se va a intentar amortizar según las horas que han sido utilizado estos programas para ejecución del proyecto. Los software utilizados para el desarrollo del proyecto son:
 - ✓ NASTRAN.
 - ✓ PATRAN.
 - ✓ Microsoft office.
- Horas de ingeniería; las horas se pueden dividir de la siguiente forma:
 - ✓ Modelado FEM.
 - ✓ Análisis y recopilación de resultados.
 - ✓ Documentación.

El presupuesto queda estructurado de la siguiente manera.

Tabla 6. 1: Costes análisis.

Coste análisis		Unidades	Precio und.	Precio
Infraestructura	Amortización PC (6% uso)	-	48 €	48 €
	Amortización software NASTRAN (3% uso)	-	180 €	180 €
	Amortización software PATRAN (2% uso)	-	120 €	120 €
	Amortización MS OFFICE (2%)	-	10 €	10 €
Horas ingeniería	Ingeniero técnico (cálculo)	260 h	50€/h	13.000 €
			Total sin IVA	13.358 €
			+18% IVA	2.404 €
			Precio total análisis	15.762 €



7. BIBLIOGRAFÍA.

- Josep Edward Shigley, **“Mechanical Engineering Design”**, Ed. McGraw-Hill.
- Tirupathi R. Chandrupatla, Ashok D. Belegundu, **“Introducción al estudio del ELEMENTO FINITO EN INGENIERÍA”**, Ed. PEARSON.
- Documentación MSC Nastran y Patran.



ANEXO I

PROGRAMACIÓN NASTRAN (GFEM)



Lenguaje programación NASTRAN del modelo GFEM

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 101
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
$ Nodes from Group: SPC
SET 1 = 3013151, 3013152, 3013232, 3013455, 3013456, 3013520, 3013743,
3013744, 3013808, 3014031, 3014032, 3014096, 3014319, 3014320, 3014384,
3014607, 3014608, 3014672, 3014895, 3014896, 3014960, 3015183, 3015184,
3015248, 3015471, 3015472, 3015536, 3015759, 3015760, 3015824, 3016047,
3016048, 3016112, 3016335, 3016336, 3016400, 3016623, 3016624, 3016688,
3016911, 3016912, 3016976, 3017199, 3017200, 3017264, 3029763, 3029764,
3029828, 3030051, 3030052, 3030116, 3030339, 3030340, 3030404, 3030627,
3030628, 3030692, 3030915, 3030916, 3030980, 3031175, 3031176, 3031232,
3031427, 3031428, 3031484, 3031679, 3031680, 3031736, 3031931, 3031932,
3031988, 3032183, 3032184, 3032240, 3032463, 3032464, 3032528, 3032751,
3032752, 3032816, 3033039, 3033040, 3033104, 3033327, 3033328, 3033392,
3033615, 3033616, 3033680
$
$
DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
SPCFORCES(SORT1,PRINT,PLOT)=1
STRESS(SORT1,PLOT,BILIN)=ALL
$
$
SUBCASE 1
SUBTITLE=ESTATICO_caso1
LOAD = 2001
SPC = 200
$
$
BEGIN BULK
$
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
```



```

$
$ GLOBAL FEM MODEL
$
include 'fem\eje_completo.bdf'
include 'fem\materiales.bdf'
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 10
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
LOAD 2001 1. 1. 1100
$
include 'fem\FORCES_CASO_1_NEW.bdf'
$ Displacement Constraints of Load Set : spc
SPC1 10 123 3013151 3013152 3013232 3013455 3013456 3013520
3013743 3013744 3013808 3014031 3014032 3014096 3014319 3014320
3014384 3014607 3014608 3014672 3014895 3014896 3014960 3015183
3015184 3015248 3015471 3015472 3015536 3015759 3015760 3015824
3016047 3016048 3016112 3016335 3016336 3016400 3016623 3016624
3016688 3016911 3016912 3016976 3017199 3017200 3017264 3029763
3029764 3029828 3030051 3030052 3030116 3030339 3030340 3030404
3030627 3030628 3030692 3030915 3030916 3030980 3031175 3031176
3031232 3031427 3031428 3031484 3031679 3031680 3031736 3031931
3031932 3031988 3032183 3032184 3032240 3032463 3032464 3032528
3032751 3032752 3032816 3033039 3033040 3033104 3033327 3033328
3033392 3033615 3033616 3033680
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec

```

NOTA:

Los includes, donde está la programación del modelo no están expuestos en este documento debido al tamaño de líneas de estos por lo que se adjuntan a este documento en formato digital.



ANEXO II

PROGRAMACIÓN NASTRAN ANÁLISIS ESTÁTICO

(DFEM)



Lenguaje programación NASTRAN del modelo DFEM, Estado I.

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 101
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
  DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
  STRESS(SORT1,PLOT,BILIN)=ALL
$
SUBCASE 1
  SUBTITLE=ESTATICO_caso1
  LOAD = 300
  SPC = 200
$
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
$
include 'fem/modelo_local_eje.bdf'
include 'fem/materiales.bdf'
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'
$
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec
```



Lenguaje programación NASTRAN del modelo DFEM, Estado II.

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 101
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
  DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
  STRESS(SORT1,PLOT,BILIN)=ALL
$
SUBCASE 1
  SUBTITLE=ESTATICO_caso1
  LOAD = 300
  SPC = 200
$
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
$
Include 'fem/modelo_local_eje_grieta2.bdf'
include 'fem/materiales.bdf'
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'
$
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec
```



Lenguaje programación NASTRAN del modelo DFEM, Estado III.

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 101
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
  DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
  STRESS(SORT1,PLOT,BILIN)=ALL
$
SUBCASE 1
  SUBTITLE=ESTATICO_caso1
  LOAD = 300
  SPC = 200
$
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
$
include 'fem/modelo_local_eje_grieta3_2.bdf'
include 'fem/materiales.bdf'
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'
$
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec
```



Lenguaje programación NASTRAN del modelo DFEM, Estado IV.

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 101
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
  DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
  STRESS(SORT1,PLOT,BILIN)=ALL
$
SUBCASE 1
  SUBTITLE=ESTATICO_caso1
  LOAD = 300
  SPC = 200
$
$
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
$
include 'fem/modelo_local_eje_grieta4_3.bdf'
include 'fem/materiales.bdf'
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'
$
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
      1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec
```




Lenguaje programación NASTRAN del modelo DFEM, Estado V.

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 101
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
  DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
  STRESS(SORT1,PLOT,BILIN)=ALL
$
SUBCASE 1
  SUBTITLE=ESTATICO_caso1
  LOAD = 300
  SPC = 200
$
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
$
include 'fem/modelo_local_eje_grieta5_4.bdf'
include 'fem/materiales.bdf'
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'
$
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec
```



NOTA:

Los includes, donde está la programación del modelo no están expuestos en este documento debido al tamaño de líneas de estos por lo que se adjuntan a este documento en formato digital.



ANEXO III

PROGRAMACIÓN NASTRAN ANÁLISIS MODAL

(DFEM)



Lenguaje programación NASTRAN del modelo DFEM, Estado I.

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 103
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
  DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
$
SUBCASE 1
  SUBTITLE=ESTATICO_caso1
  LOAD = 300
  SPC = 200
$
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
$
include 'fem/modelo_local_eje.bdf'
include 'fem/materiales.bdf'
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'
$
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec
```



Lenguaje programación NASTRAN del modelo DFEM, Estado II.

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 103
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
  DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
$
SUBCASE 1
  SUBTITLE=ESTATICO_caso1
  LOAD = 300
  SPC = 200
$
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
$
Include 'fem/modelo_local_eje_grieta2.bdf'
include 'fem/materiales.bdf'
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'
$
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
      1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec
```



Lenguaje programación NASTRAN del modelo DFEM, Estado III.

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 103
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
  DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
$
SUBCASE 1
  SUBTITLE=ESTATICO_caso1
  LOAD = 300
  SPC = 200
$
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
$
include 'fem/modelo_local_eje_grieta3_2.bdf'
include 'fem/materiales.bdf'
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'
$
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
      1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec
```



Lenguaje programación NASTRAN del modelo DFEM, Estado IV.

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 103
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
  DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
$
SUBCASE 1
  SUBTITLE=ESTATICO_caso1
  LOAD = 300
  SPC = 200
$
$
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
$
include 'fem/modelo_local_eje_grieta4_3.bdf'
include 'fem/materiales.bdf'
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'
$
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec
```



Lenguaje programación NASTRAN del modelo DFEM, Estado V.

```
$ NASTRAN input file created by the MSC MSC.Nastran input file
$ translator ( MSC.Patran 13.0.053 ) on February 25, 2002 at 20:36:35.
$ Direct Text Input for Nastran System Cell Section
$ Direct Text Input for File Management Section
SOL 103
$ Direct Text Input for Executive Control
CEND
SEALL = ALL
SUPER = ALL
TITLE = MSC.Nastran job created on 25-Feb-02 at 20:35:08
ECHO = NONE
$ Direct Text Input for Global Case Control Data
$
  DISPLACEMENT(PLOT)=ALL
$
SUBCASE 1
  SUBTITLE=ESTATICO_caso1
  LOAD = 300
  SPC = 200
$
BEGIN BULK
PARAM,POST,-1
PARAM,PRTMAXIM,YES
PARAM,AUTOSPC,NO
PARAM,K6ROT,10.0
PARAM,SNORM,20.
PARAM,GRDPNT,0
$
$ Loads for Load Case : caso_prueba01
SPCADD 200 654321
$_____8$_____8$_____8$_____8$_____8
$
include 'fem/modelo_local_eje_grieta5_4.bdf'
include 'fem/materiales.bdf'
include 'fem/SPCD_caso1_NEW.prn'
include 'fem/spc1_estatico_local.prn'
$
$ Referenced Coordinate Frames
CORD2R 8701 0. 0. 0. 0. 0. 1.
      1. 0. 0.
ENDDATA 9d9273ec
```




NOTA:

Los includes, donde está la programación del modelo no están expuestos en este documento debido al tamaño de líneas de estos por lo que se adjuntan a este documento en formato digital.



ANEXO IV

COORDENADAS NODOS SPCD

(GFEM Y DFEM)



Tabla 4. 19: Coordenadas de los nodos SPCD deformados GFEM y DFEM (tabla completa).

ID nodo GFEM	ID nodo DFEM	x (mm)	y (mm)	z (mm)
102340	5000666	0.035	-0.156	0.000
102341	5000670	0.034	-0.157	0.001
102342	5000818	0.044	-0.157	0.001
102343	5000814	0.045	-0.156	0.000
102344	5000674	0.032	-0.157	0.003
102345	5000822	0.042	-0.158	0.001
102346	5000678	0.029	-0.159	0.004
102347	5000826	0.039	-0.160	0.002
102348	5000682	0.026	-0.160	0.006
102349	5000830	0.034	-0.162	0.004
102350	5000686	0.021	-0.161	0.008
102351	5000834	0.028	-0.163	0.006
102352	5000690	0.015	-0.163	0.009
102353	5000838	0.022	-0.165	0.008
102354	5000694	0.009	-0.164	0.011
102355	5000842	0.014	-0.166	0.011
102356	5000698	0.003	-0.165	0.012
102357	5000846	0.006	-0.166	0.012
102358	5000036	-0.004	-0.166	0.013
102359	5000184	-0.002	-0.166	0.013
102360	5000966	0.054	-0.157	0.000
102361	5000962	0.054	-0.157	0.000
102362	5000970	0.051	-0.159	0.000
102363	5000974	0.048	-0.161	0.001
102364	5000978	0.042	-0.163	0.002
102365	5000982	0.036	-0.165	0.005
102366	5000986	0.028	-0.167	0.007
102367	5000990	0.020	-0.167	0.010
102368	5000994	0.010	-0.167	0.012
102369	5000332	0.000	-0.166	0.013
102370	5000004	-0.041	-0.182	0.001
102371	5000000	-0.041	-0.182	0.000
102372	5000148	-0.056	-0.183	0.000
102373	5000152	-0.055	-0.182	0.000
102374	5000008	-0.039	-0.180	0.002
102375	5000156	-0.052	-0.180	0.000
102376	5000012	-0.036	-0.178	0.004
102377	5000160	-0.048	-0.177	0.001



102378	5000016	-0.033	-0.176	0.006
102379	5000164	-0.042	-0.174	0.003
102380	5000020	-0.028	-0.173	0.008
102381	5000168	-0.036	-0.171	0.005
102382	5000024	-0.023	-0.171	0.010
102383	5000172	-0.028	-0.168	0.008
102384	5000028	-0.017	-0.169	0.011
102385	5000176	-0.019	-0.167	0.011
102386	5000032	-0.010	-0.167	0.012
102387	5000180	-0.011	-0.166	0.012
102388	5000296	-0.071	-0.183	0.000
102389	5000300	-0.070	-0.182	-0.001
102390	5000304	-0.066	-0.179	-0.002
102391	5000308	-0.060	-0.176	-0.002
102392	5000312	-0.052	-0.172	0.000
102393	5000316	-0.043	-0.168	0.003
102394	5000320	-0.033	-0.166	0.006
102395	5000324	-0.022	-0.165	0.010
102396	5000328	-0.011	-0.165	0.012
102397	5001003	0.034	-0.157	-0.001
102398	5001151	0.044	-0.157	0.000
102399	5001007	0.032	-0.157	-0.002
102400	5001155	0.042	-0.158	-0.001
102401	5001011	0.029	-0.159	-0.004
102402	5001159	0.039	-0.160	-0.002
102403	5001015	0.026	-0.160	-0.006
102404	5001163	0.034	-0.162	-0.004
102405	5001019	0.021	-0.161	-0.007
102406	5001167	0.028	-0.163	-0.006
102407	5001023	0.015	-0.163	-0.009
102408	5001171	0.022	-0.165	-0.008
102409	5001027	0.009	-0.164	-0.011
102410	5001175	0.014	-0.166	-0.010
102411	5001031	0.003	-0.165	-0.012
102412	5001179	0.006	-0.166	-0.012
102413	5000369	-0.004	-0.166	-0.012
102414	5000517	-0.002	-0.166	-0.013
102415	5001299	0.054	-0.157	0.000
102416	5001303	0.051	-0.159	0.000
102417	5001307	0.048	-0.161	-0.001
102418	5001311	0.042	-0.163	-0.002
102419	5001315	0.036	-0.165	-0.005



102420	5001319	0.028	-0.167	-0.007
102421	5001323	0.020	-0.167	-0.010
102422	5001327	0.010	-0.167	-0.012
102423	5000665	0.000	-0.166	-0.012
102424	5000337	-0.041	-0.182	-0.001
102425	5000485	-0.055	-0.182	0.000
102426	5000341	-0.039	-0.180	-0.002
102427	5000489	-0.052	-0.180	0.000
102428	5000345	-0.036	-0.178	-0.004
102429	5000493	-0.048	-0.177	-0.001
102430	5000349	-0.033	-0.176	-0.005
102431	5000497	-0.042	-0.174	-0.003
102432	5000353	-0.028	-0.173	-0.007
102433	5000501	-0.036	-0.171	-0.005
102434	5000357	-0.023	-0.171	-0.009
102435	5000505	-0.028	-0.168	-0.008
102436	5000361	-0.017	-0.169	-0.011
102437	5000509	-0.019	-0.167	-0.010
102438	5000365	-0.010	-0.167	-0.012
102439	5000513	-0.011	-0.166	-0.012
102440	5000633	-0.070	-0.182	0.002
102441	5000637	-0.066	-0.179	0.003
102442	5000641	-0.060	-0.175	0.002
102443	5000645	-0.052	-0.172	0.000
102444	5000649	-0.043	-0.168	-0.003
102445	5000653	-0.033	-0.166	-0.006
102446	5000657	-0.022	-0.165	-0.009
102447	5000661	-0.011	-0.165	-0.012
103168	5052716	0.027	-0.086	0.000
103169	5052723	0.026	-0.086	0.000
103170	5052863	0.032	-0.087	0.000
103171	5052859	0.033	-0.087	0.000
103172	5052731	0.025	-0.086	0.000
103173	5052867	0.031	-0.087	0.000
103174	5052739	0.022	-0.087	0.001
103175	5052871	0.028	-0.087	0.001
103176	5052747	0.020	-0.087	0.001
103177	5052875	0.024	-0.087	0.001
103178	5052755	0.016	-0.087	0.001
103179	5052879	0.020	-0.088	0.001
103180	5052763	0.011	-0.087	0.001
103181	5052883	0.015	-0.088	0.001



103182	5052771	0.007	-0.088	0.001
103183	5052887	0.009	-0.088	0.001
103184	5052779	0.002	-0.088	0.001
103185	5052891	0.003	-0.088	0.002
103186	5052158	-0.004	-0.088	0.001
103187	5052270	-0.003	-0.088	0.002
103188	5053007	0.038	-0.087	0.000
103189	5053003	0.038	-0.087	0.000
103190	5053011	0.036	-0.087	0.000
103191	5053015	0.033	-0.088	0.001
103192	5053019	0.029	-0.088	0.001
103193	5053023	0.024	-0.088	0.001
103194	5053027	0.018	-0.088	0.002
103195	5053031	0.011	-0.088	0.002
103196	5053035	0.004	-0.088	0.002
103197	5052418	-0.003	-0.088	0.002
103198	5053151	0.043	-0.088	0.000
103199	5053147	0.044	-0.088	0.000
103200	5053155	0.041	-0.088	0.001
103201	5053159	0.038	-0.088	0.001
103202	5053163	0.033	-0.088	0.001
103203	5053167	0.028	-0.088	0.001
103204	5053171	0.021	-0.088	0.002
103205	5053175	0.014	-0.088	0.002
103206	5053179	0.005	-0.088	0.002
103207	5052566	-0.003	-0.088	0.002
103208	5053295	0.049	-0.088	0.000
103209	5053291	0.050	-0.088	0.000
103210	5053299	0.047	-0.088	0.000
103211	5053303	0.043	-0.088	0.001
103212	5053307	0.038	-0.088	0.001
103213	5053311	0.032	-0.088	0.002
103214	5053315	0.024	-0.088	0.002
103215	5053319	0.016	-0.088	0.002
103216	5053323	0.007	-0.088	0.002
103217	5052714	-0.003	-0.087	0.002
103218	5052094	-0.035	-0.089	0.000
103219	5052086	-0.035	-0.090	0.000
103220	5052235	-0.042	-0.090	0.000
103221	5052238	-0.041	-0.090	0.000
103222	5052102	-0.033	-0.089	0.000
103223	5052242	-0.039	-0.090	0.000



103224	5052110	-0.031	-0.089	0.001
103225	5052246	-0.036	-0.090	0.000
103226	5052118	-0.028	-0.089	0.001
103227	5052250	-0.032	-0.089	0.000
103228	5052126	-0.024	-0.089	0.001
103229	5052254	-0.028	-0.089	0.001
103230	5052134	-0.019	-0.089	0.001
103231	5052258	-0.022	-0.089	0.001
103232	5052142	-0.014	-0.088	0.001
103233	5052262	-0.016	-0.088	0.001
103234	5052150	-0.009	-0.088	0.001
103235	5052266	-0.010	-0.088	0.001
103236	5052383	-0.048	-0.091	0.000
103237	5052386	-0.047	-0.091	0.000
103238	5052390	-0.045	-0.090	0.000
103239	5052394	-0.042	-0.090	0.000
103240	5052398	-0.037	-0.089	0.000
103241	5052402	-0.031	-0.089	0.000
103242	5052406	-0.025	-0.088	0.001
103243	5052410	-0.018	-0.088	0.001
103244	5052414	-0.011	-0.088	0.001
103245	5052531	-0.054	-0.091	0.000
103246	5052534	-0.053	-0.091	0.000
103247	5052538	-0.050	-0.091	-0.001
103248	5052542	-0.047	-0.090	-0.001
103249	5052546	-0.041	-0.089	-0.001
103250	5052550	-0.035	-0.089	0.000
103251	5052554	-0.028	-0.088	0.000
103252	5052558	-0.020	-0.088	0.001
103253	5052562	-0.011	-0.088	0.001
103254	5052679	-0.060	-0.092	0.000
103255	5052682	-0.059	-0.091	-0.001
103256	5052686	-0.056	-0.091	-0.001
103257	5052690	-0.052	-0.090	-0.001
103258	5052694	-0.046	-0.089	-0.001
103259	5052698	-0.039	-0.088	-0.001
103260	5052702	-0.031	-0.088	0.000
103261	5052706	-0.022	-0.087	0.001
103262	5052710	-0.012	-0.087	0.001
103263	5053945	0.026	-0.086	0.000
103264	5054082	0.032	-0.087	0.000
103265	5053953	0.025	-0.086	0.000



103266	5054086	0.031	-0.087	0.000
103267	5053961	0.022	-0.087	0.000
103268	5054090	0.028	-0.087	0.000
103269	5053969	0.020	-0.087	-0.001
103270	5054094	0.024	-0.087	-0.001
103271	5053977	0.016	-0.087	-0.001
103272	5054098	0.020	-0.088	-0.001
103273	5053985	0.011	-0.087	-0.001
103274	5054102	0.015	-0.088	-0.001
103275	5053993	0.007	-0.088	-0.001
103276	5054106	0.009	-0.088	-0.001
103277	5054001	0.002	-0.088	-0.001
103278	5054110	0.003	-0.088	-0.001
103279	5053397	-0.004	-0.088	-0.001
103280	5053506	-0.003	-0.088	-0.001
103281	5054222	0.038	-0.087	0.000
103282	5054226	0.036	-0.087	0.000
103283	5054230	0.033	-0.088	-0.001
103284	5054234	0.029	-0.088	-0.001
103285	5054238	0.024	-0.088	-0.001
103286	5054242	0.018	-0.088	-0.001
103287	5054246	0.011	-0.088	-0.002
103288	5054250	0.004	-0.088	-0.002
103289	5053650	-0.003	-0.088	-0.001
103290	5054362	0.043	-0.088	0.000
103291	5054366	0.041	-0.088	0.000
103292	5054370	0.038	-0.088	-0.001
103293	5054374	0.033	-0.088	-0.001
103294	5054378	0.028	-0.088	-0.001
103295	5054382	0.021	-0.088	-0.002
103296	5054386	0.014	-0.088	-0.002
103297	5054390	0.005	-0.088	-0.002
103298	5053794	-0.003	-0.088	-0.002
103299	5054502	0.049	-0.088	0.000
103300	5054506	0.047	-0.088	0.000
103301	5054510	0.043	-0.088	-0.001
103302	5054514	0.038	-0.088	-0.001
103303	5054518	0.032	-0.088	-0.001
103304	5054522	0.024	-0.088	-0.002
103305	5054526	0.016	-0.088	-0.002
103306	5054530	0.007	-0.088	-0.002
103307	5053938	-0.003	-0.087	-0.002



103308	5053333	-0.035	-0.089	0.000
103309	5053474	-0.041	-0.090	0.000
103310	5053341	-0.033	-0.089	0.000
103311	5053478	-0.039	-0.090	0.000
103312	5053349	-0.031	-0.089	0.000
103313	5053482	-0.036	-0.089	0.000
103314	5053357	-0.028	-0.089	-0.001
103315	5053486	-0.032	-0.089	0.000
103316	5053365	-0.024	-0.089	-0.001
103317	5053490	-0.028	-0.089	0.000
103318	5053373	-0.019	-0.089	-0.001
103319	5053494	-0.022	-0.088	-0.001
103320	5053381	-0.014	-0.088	-0.001
103321	5053498	-0.016	-0.088	-0.001
103322	5053389	-0.009	-0.088	-0.001
103323	5053502	-0.010	-0.088	-0.001
103324	5053618	-0.047	-0.091	0.000
103325	5053622	-0.045	-0.090	0.001
103326	5053626	-0.042	-0.090	0.001
103327	5053630	-0.037	-0.089	0.000
103328	5053634	-0.031	-0.089	0.000
103329	5053638	-0.025	-0.088	0.000
103330	5053642	-0.018	-0.088	-0.001
103331	5053646	-0.011	-0.088	-0.001
103332	5053762	-0.053	-0.091	0.001
103333	5053766	-0.050	-0.091	0.001
103334	5053770	-0.047	-0.090	0.001
103335	5053774	-0.041	-0.089	0.001
103336	5053778	-0.035	-0.089	0.001
103337	5053782	-0.028	-0.088	0.000
103338	5053786	-0.020	-0.088	-0.001
103339	5053790	-0.011	-0.088	-0.001
103340	5053906	-0.059	-0.091	0.001
103341	5053910	-0.056	-0.091	0.001
103342	5053914	-0.052	-0.090	0.001
103343	5053918	-0.046	-0.089	0.001
103344	5053922	-0.039	-0.088	0.001
103345	5053926	-0.031	-0.088	0.000
103346	5053930	-0.022	-0.087	0.000
103347	5053934	-0.012	-0.087	-0.001



ANEXO V

TARJETAS NASTRAN SPCD

(DFEM)



Tabla 4. 20: Tarjetas NASTRAN para las SPCD (DFEM) tabla completa.

Tipo tarjeta	SID	Gi	Ci	Di
SPCD	300	5000666	1	0.035
SPCD	300	5000666	2	-0.156
SPCD	300	5000666	3	0.000
SPCD	300	5000670	1	0.034
SPCD	300	5000670	2	-0.157
SPCD	300	5000670	3	0.001
SPCD	300	5000818	1	0.044
SPCD	300	5000818	2	-0.157
SPCD	300	5000818	3	0.001
SPCD	300	5000814	1	0.045
SPCD	300	5000814	2	-0.156
SPCD	300	5000814	3	0.000
SPCD	300	5000674	1	0.032
SPCD	300	5000674	2	-0.157
SPCD	300	5000674	3	0.003
SPCD	300	5000822	1	0.042
SPCD	300	5000822	2	-0.158
SPCD	300	5000822	3	0.001
SPCD	300	5000678	1	0.029
SPCD	300	5000678	2	-0.159
SPCD	300	5000678	3	0.004
SPCD	300	5000826	1	0.039
SPCD	300	5000826	2	-0.160
SPCD	300	5000826	3	0.002
SPCD	300	5000682	1	0.026
SPCD	300	5000682	2	-0.160
SPCD	300	5000682	3	0.006
SPCD	300	5000830	1	0.034
SPCD	300	5000830	2	-0.162
SPCD	300	5000830	3	0.004
SPCD	300	5000686	1	0.021
SPCD	300	5000686	2	-0.161
SPCD	300	5000686	3	0.008
SPCD	300	5000834	1	0.028
SPCD	300	5000834	2	-0.163
SPCD	300	5000834	3	0.006
SPCD	300	5000690	1	0.015
SPCD	300	5000690	2	-0.163



SPCD	300	5000690	3	0.009
SPCD	300	5000838	1	0.022
SPCD	300	5000838	2	-0.165
SPCD	300	5000838	3	0.008
SPCD	300	5000694	1	0.009
SPCD	300	5000694	2	-0.164
SPCD	300	5000694	3	0.011
SPCD	300	5000842	1	0.014
SPCD	300	5000842	2	-0.166
SPCD	300	5000842	3	0.011
SPCD	300	5000698	1	0.003
SPCD	300	5000698	2	-0.165
SPCD	300	5000698	3	0.012
SPCD	300	5000846	1	0.006
SPCD	300	5000846	2	-0.166
SPCD	300	5000846	3	0.012
SPCD	300	5000036	1	-0.004
SPCD	300	5000036	2	-0.166
SPCD	300	5000036	3	0.013
SPCD	300	5000184	1	-0.002
SPCD	300	5000184	2	-0.166
SPCD	300	5000184	3	0.013
SPCD	300	5000966	1	0.054
SPCD	300	5000966	2	-0.157
SPCD	300	5000966	3	0.000
SPCD	300	5000962	1	0.054
SPCD	300	5000962	2	-0.157
SPCD	300	5000962	3	0.000
SPCD	300	5000970	1	0.051
SPCD	300	5000970	2	-0.159
SPCD	300	5000970	3	0.000
SPCD	300	5000974	1	0.048
SPCD	300	5000974	2	-0.161
SPCD	300	5000974	3	0.001
SPCD	300	5000978	1	0.042
SPCD	300	5000978	2	-0.163
SPCD	300	5000978	3	0.002
SPCD	300	5000982	1	0.036
SPCD	300	5000982	2	-0.165
SPCD	300	5000982	3	0.005
SPCD	300	5000986	1	0.028



SPCD	300	5000986	2	-0.167
SPCD	300	5000986	3	0.007
SPCD	300	5000990	1	0.020
SPCD	300	5000990	2	-0.167
SPCD	300	5000990	3	0.010
SPCD	300	5000994	1	0.010
SPCD	300	5000994	2	-0.167
SPCD	300	5000994	3	0.012
SPCD	300	5000332	1	0.000
SPCD	300	5000332	2	-0.166
SPCD	300	5000332	3	0.013
SPCD	300	5000004	1	-0.041
SPCD	300	5000004	2	-0.182
SPCD	300	5000004	3	0.001
SPCD	300	5000000	1	-0.041
SPCD	300	5000000	2	-0.182
SPCD	300	5000000	3	0.000
SPCD	300	5000148	1	-0.056
SPCD	300	5000148	2	-0.183
SPCD	300	5000148	3	0.000
SPCD	300	5000152	1	-0.055
SPCD	300	5000152	2	-0.182
SPCD	300	5000152	3	0.000
SPCD	300	5000008	1	-0.039
SPCD	300	5000008	2	-0.180
SPCD	300	5000008	3	0.002
SPCD	300	5000156	1	-0.052
SPCD	300	5000156	2	-0.180
SPCD	300	5000156	3	0.000
SPCD	300	5000012	1	-0.036
SPCD	300	5000012	2	-0.178
SPCD	300	5000012	3	0.004
SPCD	300	5000160	1	-0.048
SPCD	300	5000160	2	-0.177
SPCD	300	5000160	3	0.001
SPCD	300	5000016	1	-0.033
SPCD	300	5000016	2	-0.176
SPCD	300	5000016	3	0.006
SPCD	300	5000164	1	-0.042
SPCD	300	5000164	2	-0.174
SPCD	300	5000164	3	0.003



SPCD	300	5000020	1	-0.028
SPCD	300	5000020	2	-0.173
SPCD	300	5000020	3	0.008
SPCD	300	5000168	1	-0.036
SPCD	300	5000168	2	-0.171
SPCD	300	5000168	3	0.005
SPCD	300	5000024	1	-0.023
SPCD	300	5000024	2	-0.171
SPCD	300	5000024	3	0.010
SPCD	300	5000172	1	-0.028
SPCD	300	5000172	2	-0.168
SPCD	300	5000172	3	0.008
SPCD	300	5000028	1	-0.017
SPCD	300	5000028	2	-0.169
SPCD	300	5000028	3	0.011
SPCD	300	5000176	1	-0.019
SPCD	300	5000176	2	-0.167
SPCD	300	5000176	3	0.011
SPCD	300	5000032	1	-0.010
SPCD	300	5000032	2	-0.167
SPCD	300	5000032	3	0.012
SPCD	300	5000180	1	-0.011
SPCD	300	5000180	2	-0.166
SPCD	300	5000180	3	0.012
SPCD	300	5000296	1	-0.071
SPCD	300	5000296	2	-0.183
SPCD	300	5000296	3	0.000
SPCD	300	5000300	1	-0.070
SPCD	300	5000300	2	-0.182
SPCD	300	5000300	3	-0.001
SPCD	300	5000304	1	-0.066
SPCD	300	5000304	2	-0.179
SPCD	300	5000304	3	-0.002
SPCD	300	5000308	1	-0.060
SPCD	300	5000308	2	-0.176
SPCD	300	5000308	3	-0.002
SPCD	300	5000312	1	-0.052
SPCD	300	5000312	2	-0.172
SPCD	300	5000312	3	0.000
SPCD	300	5000316	1	-0.043
SPCD	300	5000316	2	-0.168



SPCD	300	5000316	3	0.003
SPCD	300	5000320	1	-0.033
SPCD	300	5000320	2	-0.166
SPCD	300	5000320	3	0.006
SPCD	300	5000324	1	-0.022
SPCD	300	5000324	2	-0.165
SPCD	300	5000324	3	0.010
SPCD	300	5000328	1	-0.011
SPCD	300	5000328	2	-0.165
SPCD	300	5000328	3	0.012
SPCD	300	5001003	1	0.034
SPCD	300	5001003	2	-0.157
SPCD	300	5001003	3	-0.001
SPCD	300	5001151	1	0.044
SPCD	300	5001151	2	-0.157
SPCD	300	5001151	3	0.000
SPCD	300	5001007	1	0.032
SPCD	300	5001007	2	-0.157
SPCD	300	5001007	3	-0.002
SPCD	300	5001155	1	0.042
SPCD	300	5001155	2	-0.158
SPCD	300	5001155	3	-0.001
SPCD	300	5001011	1	0.029
SPCD	300	5001011	2	-0.159
SPCD	300	5001011	3	-0.004
SPCD	300	5001159	1	0.039
SPCD	300	5001159	2	-0.160
SPCD	300	5001159	3	-0.002
SPCD	300	5001015	1	0.026
SPCD	300	5001015	2	-0.160
SPCD	300	5001015	3	-0.006
SPCD	300	5001163	1	0.034
SPCD	300	5001163	2	-0.162
SPCD	300	5001163	3	-0.004
SPCD	300	5001019	1	0.021
SPCD	300	5001019	2	-0.161
SPCD	300	5001019	3	-0.007
SPCD	300	5001167	1	0.028
SPCD	300	5001167	2	-0.163
SPCD	300	5001167	3	-0.006
SPCD	300	5001023	1	0.015



SPCD	300	5001023	2	-0.163
SPCD	300	5001023	3	-0.009
SPCD	300	5001171	1	0.022
SPCD	300	5001171	2	-0.165
SPCD	300	5001171	3	-0.008
SPCD	300	5001027	1	0.009
SPCD	300	5001027	2	-0.164
SPCD	300	5001027	3	-0.011
SPCD	300	5001175	1	0.014
SPCD	300	5001175	2	-0.166
SPCD	300	5001175	3	-0.010
SPCD	300	5001031	1	0.003
SPCD	300	5001031	2	-0.165
SPCD	300	5001031	3	-0.012
SPCD	300	5001179	1	0.006
SPCD	300	5001179	2	-0.166
SPCD	300	5001179	3	-0.012
SPCD	300	5000369	1	-0.004
SPCD	300	5000369	2	-0.166
SPCD	300	5000369	3	-0.012
SPCD	300	5000517	1	-0.002
SPCD	300	5000517	2	-0.166
SPCD	300	5000517	3	-0.013
SPCD	300	5001299	1	0.054
SPCD	300	5001299	2	-0.157
SPCD	300	5001299	3	0.000
SPCD	300	5001303	1	0.051
SPCD	300	5001303	2	-0.159
SPCD	300	5001303	3	0.000
SPCD	300	5001307	1	0.048
SPCD	300	5001307	2	-0.161
SPCD	300	5001307	3	-0.001
SPCD	300	5001311	1	0.042
SPCD	300	5001311	2	-0.163
SPCD	300	5001311	3	-0.002
SPCD	300	5001315	1	0.036
SPCD	300	5001315	2	-0.165
SPCD	300	5001315	3	-0.005
SPCD	300	5001319	1	0.028
SPCD	300	5001319	2	-0.167
SPCD	300	5001319	3	-0.007



SPCD	300	5001323	1	0.020
SPCD	300	5001323	2	-0.167
SPCD	300	5001323	3	-0.010
SPCD	300	5001327	1	0.010
SPCD	300	5001327	2	-0.167
SPCD	300	5001327	3	-0.012
SPCD	300	5000665	1	0.000
SPCD	300	5000665	2	-0.166
SPCD	300	5000665	3	-0.012
SPCD	300	5000337	1	-0.041
SPCD	300	5000337	2	-0.182
SPCD	300	5000337	3	-0.001
SPCD	300	5000485	1	-0.055
SPCD	300	5000485	2	-0.182
SPCD	300	5000485	3	0.000
SPCD	300	5000341	1	-0.039
SPCD	300	5000341	2	-0.180
SPCD	300	5000341	3	-0.002
SPCD	300	5000489	1	-0.052
SPCD	300	5000489	2	-0.180
SPCD	300	5000489	3	0.000
SPCD	300	5000345	1	-0.036
SPCD	300	5000345	2	-0.178
SPCD	300	5000345	3	-0.004
SPCD	300	5000493	1	-0.048
SPCD	300	5000493	2	-0.177
SPCD	300	5000493	3	-0.001
SPCD	300	5000349	1	-0.033
SPCD	300	5000349	2	-0.176
SPCD	300	5000349	3	-0.005
SPCD	300	5000497	1	-0.042
SPCD	300	5000497	2	-0.174
SPCD	300	5000497	3	-0.003
SPCD	300	5000353	1	-0.028
SPCD	300	5000353	2	-0.173
SPCD	300	5000353	3	-0.007
SPCD	300	5000501	1	-0.036
SPCD	300	5000501	2	-0.171
SPCD	300	5000501	3	-0.005
SPCD	300	5000357	1	-0.023
SPCD	300	5000357	2	-0.171



SPCD	300	5000357	3	-0.009
SPCD	300	5000505	1	-0.028
SPCD	300	5000505	2	-0.168
SPCD	300	5000505	3	-0.008
SPCD	300	5000361	1	-0.017
SPCD	300	5000361	2	-0.169
SPCD	300	5000361	3	-0.011
SPCD	300	5000509	1	-0.019
SPCD	300	5000509	2	-0.167
SPCD	300	5000509	3	-0.010
SPCD	300	5000365	1	-0.010
SPCD	300	5000365	2	-0.167
SPCD	300	5000365	3	-0.012
SPCD	300	5000513	1	-0.011
SPCD	300	5000513	2	-0.166
SPCD	300	5000513	3	-0.012
SPCD	300	5000633	1	-0.070
SPCD	300	5000633	2	-0.182
SPCD	300	5000633	3	0.002
SPCD	300	5000637	1	-0.066
SPCD	300	5000637	2	-0.179
SPCD	300	5000637	3	0.003
SPCD	300	5000641	1	-0.060
SPCD	300	5000641	2	-0.175
SPCD	300	5000641	3	0.002
SPCD	300	5000645	1	-0.052
SPCD	300	5000645	2	-0.172
SPCD	300	5000645	3	0.000
SPCD	300	5000649	1	-0.043
SPCD	300	5000649	2	-0.168
SPCD	300	5000649	3	-0.003
SPCD	300	5000653	1	-0.033
SPCD	300	5000653	2	-0.166
SPCD	300	5000653	3	-0.006
SPCD	300	5000657	1	-0.022
SPCD	300	5000657	2	-0.165
SPCD	300	5000657	3	-0.009
SPCD	300	5000661	1	-0.011
SPCD	300	5000661	2	-0.165
SPCD	300	5000661	3	-0.012
SPCD	300	5052716	1	0.027



SPCD	300	5052716	2	-0.086
SPCD	300	5052716	3	0.000
SPCD	300	5052723	1	0.026
SPCD	300	5052723	2	-0.086
SPCD	300	5052723	3	0.000
SPCD	300	5052863	1	0.032
SPCD	300	5052863	2	-0.087
SPCD	300	5052863	3	0.000
SPCD	300	5052859	1	0.033
SPCD	300	5052859	2	-0.087
SPCD	300	5052859	3	0.000
SPCD	300	5052731	1	0.025
SPCD	300	5052731	2	-0.086
SPCD	300	5052731	3	0.000
SPCD	300	5052867	1	0.031
SPCD	300	5052867	2	-0.087
SPCD	300	5052867	3	0.000
SPCD	300	5052739	1	0.022
SPCD	300	5052739	2	-0.087
SPCD	300	5052739	3	0.001
SPCD	300	5052871	1	0.028
SPCD	300	5052871	2	-0.087
SPCD	300	5052871	3	0.001
SPCD	300	5052747	1	0.020
SPCD	300	5052747	2	-0.087
SPCD	300	5052747	3	0.001
SPCD	300	5052875	1	0.024
SPCD	300	5052875	2	-0.087
SPCD	300	5052875	3	0.001
SPCD	300	5052755	1	0.016
SPCD	300	5052755	2	-0.087
SPCD	300	5052755	3	0.001
SPCD	300	5052879	1	0.020
SPCD	300	5052879	2	-0.088
SPCD	300	5052879	3	0.001
SPCD	300	5052763	1	0.011
SPCD	300	5052763	2	-0.087
SPCD	300	5052763	3	0.001
SPCD	300	5052883	1	0.015
SPCD	300	5052883	2	-0.088
SPCD	300	5052883	3	0.001



SPCD	300	5052771	1	0.007
SPCD	300	5052771	2	-0.088
SPCD	300	5052771	3	0.001
SPCD	300	5052887	1	0.009
SPCD	300	5052887	2	-0.088
SPCD	300	5052887	3	0.001
SPCD	300	5052779	1	0.002
SPCD	300	5052779	2	-0.088
SPCD	300	5052779	3	0.001
SPCD	300	5052891	1	0.003
SPCD	300	5052891	2	-0.088
SPCD	300	5052891	3	0.002
SPCD	300	5052158	1	-0.004
SPCD	300	5052158	2	-0.088
SPCD	300	5052158	3	0.001
SPCD	300	5052270	1	-0.003
SPCD	300	5052270	2	-0.088
SPCD	300	5052270	3	0.002
SPCD	300	5053007	1	0.038
SPCD	300	5053007	2	-0.087
SPCD	300	5053007	3	0.000
SPCD	300	5053003	1	0.038
SPCD	300	5053003	2	-0.087
SPCD	300	5053003	3	0.000
SPCD	300	5053011	1	0.036
SPCD	300	5053011	2	-0.087
SPCD	300	5053011	3	0.000
SPCD	300	5053015	1	0.033
SPCD	300	5053015	2	-0.088
SPCD	300	5053015	3	0.001
SPCD	300	5053019	1	0.029
SPCD	300	5053019	2	-0.088
SPCD	300	5053019	3	0.001
SPCD	300	5053023	1	0.024
SPCD	300	5053023	2	-0.088
SPCD	300	5053023	3	0.001
SPCD	300	5053027	1	0.018
SPCD	300	5053027	2	-0.088
SPCD	300	5053027	3	0.002
SPCD	300	5053031	1	0.011
SPCD	300	5053031	2	-0.088



SPCD	300	5053031	3	0.002
SPCD	300	5053035	1	0.004
SPCD	300	5053035	2	-0.088
SPCD	300	5053035	3	0.002
SPCD	300	5052418	1	-0.003
SPCD	300	5052418	2	-0.088
SPCD	300	5052418	3	0.002
SPCD	300	5053151	1	0.043
SPCD	300	5053151	2	-0.088
SPCD	300	5053151	3	0.000
SPCD	300	5053147	1	0.044
SPCD	300	5053147	2	-0.088
SPCD	300	5053147	3	0.000
SPCD	300	5053155	1	0.041
SPCD	300	5053155	2	-0.088
SPCD	300	5053155	3	0.001
SPCD	300	5053159	1	0.038
SPCD	300	5053159	2	-0.088
SPCD	300	5053159	3	0.001
SPCD	300	5053163	1	0.033
SPCD	300	5053163	2	-0.088
SPCD	300	5053163	3	0.001
SPCD	300	5053167	1	0.028
SPCD	300	5053167	2	-0.088
SPCD	300	5053167	3	0.001
SPCD	300	5053171	1	0.021
SPCD	300	5053171	2	-0.088
SPCD	300	5053171	3	0.002
SPCD	300	5053175	1	0.014
SPCD	300	5053175	2	-0.088
SPCD	300	5053175	3	0.002
SPCD	300	5053179	1	0.005
SPCD	300	5053179	2	-0.088
SPCD	300	5053179	3	0.002
SPCD	300	5052566	1	-0.003
SPCD	300	5052566	2	-0.088
SPCD	300	5052566	3	0.002
SPCD	300	5053295	1	0.049
SPCD	300	5053295	2	-0.088
SPCD	300	5053295	3	0.000
SPCD	300	5053291	1	0.050



SPCD	300	5053291	2	-0.088
SPCD	300	5053291	3	0.000
SPCD	300	5053299	1	0.047
SPCD	300	5053299	2	-0.088
SPCD	300	5053299	3	0.000
SPCD	300	5053303	1	0.043
SPCD	300	5053303	2	-0.088
SPCD	300	5053303	3	0.001
SPCD	300	5053307	1	0.038
SPCD	300	5053307	2	-0.088
SPCD	300	5053307	3	0.001
SPCD	300	5053311	1	0.032
SPCD	300	5053311	2	-0.088
SPCD	300	5053311	3	0.002
SPCD	300	5053315	1	0.024
SPCD	300	5053315	2	-0.088
SPCD	300	5053315	3	0.002
SPCD	300	5053319	1	0.016
SPCD	300	5053319	2	-0.088
SPCD	300	5053319	3	0.002
SPCD	300	5053323	1	0.007
SPCD	300	5053323	2	-0.088
SPCD	300	5053323	3	0.002
SPCD	300	5052714	1	-0.003
SPCD	300	5052714	2	-0.087
SPCD	300	5052714	3	0.002
SPCD	300	5052094	1	-0.035
SPCD	300	5052094	2	-0.089
SPCD	300	5052094	3	0.000
SPCD	300	5052086	1	-0.035
SPCD	300	5052086	2	-0.090
SPCD	300	5052086	3	0.000
SPCD	300	5052235	1	-0.042
SPCD	300	5052235	2	-0.090
SPCD	300	5052235	3	0.000
SPCD	300	5052238	1	-0.041
SPCD	300	5052238	2	-0.090
SPCD	300	5052238	3	0.000
SPCD	300	5052102	1	-0.033
SPCD	300	5052102	2	-0.089
SPCD	300	5052102	3	0.000



SPCD	300	5052242	1	-0.039
SPCD	300	5052242	2	-0.090
SPCD	300	5052242	3	0.000
SPCD	300	5052110	1	-0.031
SPCD	300	5052110	2	-0.089
SPCD	300	5052110	3	0.001
SPCD	300	5052246	1	-0.036
SPCD	300	5052246	2	-0.090
SPCD	300	5052246	3	0.000
SPCD	300	5052118	1	-0.028
SPCD	300	5052118	2	-0.089
SPCD	300	5052118	3	0.001
SPCD	300	5052250	1	-0.032
SPCD	300	5052250	2	-0.089
SPCD	300	5052250	3	0.000
SPCD	300	5052126	1	-0.024
SPCD	300	5052126	2	-0.089
SPCD	300	5052126	3	0.001
SPCD	300	5052254	1	-0.028
SPCD	300	5052254	2	-0.089
SPCD	300	5052254	3	0.001
SPCD	300	5052134	1	-0.019
SPCD	300	5052134	2	-0.089
SPCD	300	5052134	3	0.001
SPCD	300	5052258	1	-0.022
SPCD	300	5052258	2	-0.089
SPCD	300	5052258	3	0.001
SPCD	300	5052142	1	-0.014
SPCD	300	5052142	2	-0.088
SPCD	300	5052142	3	0.001
SPCD	300	5052262	1	-0.016
SPCD	300	5052262	2	-0.088
SPCD	300	5052262	3	0.001
SPCD	300	5052150	1	-0.009
SPCD	300	5052150	2	-0.088
SPCD	300	5052150	3	0.001
SPCD	300	5052266	1	-0.010
SPCD	300	5052266	2	-0.088
SPCD	300	5052266	3	0.001
SPCD	300	5052383	1	-0.048
SPCD	300	5052383	2	-0.091



SPCD	300	5052383	3	0.000
SPCD	300	5052386	1	-0.047
SPCD	300	5052386	2	-0.091
SPCD	300	5052386	3	0.000
SPCD	300	5052390	1	-0.045
SPCD	300	5052390	2	-0.090
SPCD	300	5052390	3	0.000
SPCD	300	5052394	1	-0.042
SPCD	300	5052394	2	-0.090
SPCD	300	5052394	3	0.000
SPCD	300	5052398	1	-0.037
SPCD	300	5052398	2	-0.089
SPCD	300	5052398	3	0.000
SPCD	300	5052402	1	-0.031
SPCD	300	5052402	2	-0.089
SPCD	300	5052402	3	0.000
SPCD	300	5052406	1	-0.025
SPCD	300	5052406	2	-0.088
SPCD	300	5052406	3	0.001
SPCD	300	5052410	1	-0.018
SPCD	300	5052410	2	-0.088
SPCD	300	5052410	3	0.001
SPCD	300	5052414	1	-0.011
SPCD	300	5052414	2	-0.088
SPCD	300	5052414	3	0.001
SPCD	300	5052531	1	-0.054
SPCD	300	5052531	2	-0.091
SPCD	300	5052531	3	0.000
SPCD	300	5052534	1	-0.053
SPCD	300	5052534	2	-0.091
SPCD	300	5052534	3	0.000
SPCD	300	5052538	1	-0.050
SPCD	300	5052538	2	-0.091
SPCD	300	5052538	3	-0.001
SPCD	300	5052542	1	-0.047
SPCD	300	5052542	2	-0.090
SPCD	300	5052542	3	-0.001
SPCD	300	5052546	1	-0.041
SPCD	300	5052546	2	-0.089
SPCD	300	5052546	3	-0.001
SPCD	300	5052550	1	-0.035



SPCD	300	5052550	2	-0.089
SPCD	300	5052550	3	0.000
SPCD	300	5052554	1	-0.028
SPCD	300	5052554	2	-0.088
SPCD	300	5052554	3	0.000
SPCD	300	5052558	1	-0.020
SPCD	300	5052558	2	-0.088
SPCD	300	5052558	3	0.001
SPCD	300	5052562	1	-0.011
SPCD	300	5052562	2	-0.088
SPCD	300	5052562	3	0.001
SPCD	300	5052679	1	-0.060
SPCD	300	5052679	2	-0.092
SPCD	300	5052679	3	0.000
SPCD	300	5052682	1	-0.059
SPCD	300	5052682	2	-0.091
SPCD	300	5052682	3	-0.001
SPCD	300	5052686	1	-0.056
SPCD	300	5052686	2	-0.091
SPCD	300	5052686	3	-0.001
SPCD	300	5052690	1	-0.052
SPCD	300	5052690	2	-0.090
SPCD	300	5052690	3	-0.001
SPCD	300	5052694	1	-0.046
SPCD	300	5052694	2	-0.089
SPCD	300	5052694	3	-0.001
SPCD	300	5052698	1	-0.039
SPCD	300	5052698	2	-0.088
SPCD	300	5052698	3	-0.001
SPCD	300	5052702	1	-0.031
SPCD	300	5052702	2	-0.088
SPCD	300	5052702	3	0.000
SPCD	300	5052706	1	-0.022
SPCD	300	5052706	2	-0.087
SPCD	300	5052706	3	0.001
SPCD	300	5052710	1	-0.012
SPCD	300	5052710	2	-0.087
SPCD	300	5052710	3	0.001
SPCD	300	5053945	1	0.026
SPCD	300	5053945	2	-0.086
SPCD	300	5053945	3	0.000



SPCD	300	5054082	1	0.032
SPCD	300	5054082	2	-0.087
SPCD	300	5054082	3	0.000
SPCD	300	5053953	1	0.025
SPCD	300	5053953	2	-0.086
SPCD	300	5053953	3	0.000
SPCD	300	5054086	1	0.031
SPCD	300	5054086	2	-0.087
SPCD	300	5054086	3	0.000
SPCD	300	5053961	1	0.022
SPCD	300	5053961	2	-0.087
SPCD	300	5053961	3	0.000
SPCD	300	5054090	1	0.028
SPCD	300	5054090	2	-0.087
SPCD	300	5054090	3	0.000
SPCD	300	5053969	1	0.020
SPCD	300	5053969	2	-0.087
SPCD	300	5053969	3	-0.001
SPCD	300	5054094	1	0.024
SPCD	300	5054094	2	-0.087
SPCD	300	5054094	3	-0.001
SPCD	300	5053977	1	0.016
SPCD	300	5053977	2	-0.087
SPCD	300	5053977	3	-0.001
SPCD	300	5054098	1	0.020
SPCD	300	5054098	2	-0.088
SPCD	300	5054098	3	-0.001
SPCD	300	5053985	1	0.011
SPCD	300	5053985	2	-0.087
SPCD	300	5053985	3	-0.001
SPCD	300	5054102	1	0.015
SPCD	300	5054102	2	-0.088
SPCD	300	5054102	3	-0.001
SPCD	300	5053993	1	0.007
SPCD	300	5053993	2	-0.088
SPCD	300	5053993	3	-0.001
SPCD	300	5054106	1	0.009
SPCD	300	5054106	2	-0.088
SPCD	300	5054106	3	-0.001
SPCD	300	5054001	1	0.002
SPCD	300	5054001	2	-0.088



SPCD	300	5054001	3	-0.001
SPCD	300	5054110	1	0.003
SPCD	300	5054110	2	-0.088
SPCD	300	5054110	3	-0.001
SPCD	300	5053397	1	-0.004
SPCD	300	5053397	2	-0.088
SPCD	300	5053397	3	-0.001
SPCD	300	5053506	1	-0.003
SPCD	300	5053506	2	-0.088
SPCD	300	5053506	3	-0.001
SPCD	300	5054222	1	0.038
SPCD	300	5054222	2	-0.087
SPCD	300	5054222	3	0.000
SPCD	300	5054226	1	0.036
SPCD	300	5054226	2	-0.087
SPCD	300	5054226	3	0.000
SPCD	300	5054230	1	0.033
SPCD	300	5054230	2	-0.088
SPCD	300	5054230	3	-0.001
SPCD	300	5054234	1	0.029
SPCD	300	5054234	2	-0.088
SPCD	300	5054234	3	-0.001
SPCD	300	5054238	1	0.024
SPCD	300	5054238	2	-0.088
SPCD	300	5054238	3	-0.001
SPCD	300	5054242	1	0.018
SPCD	300	5054242	2	-0.088
SPCD	300	5054242	3	-0.001
SPCD	300	5054246	1	0.011
SPCD	300	5054246	2	-0.088
SPCD	300	5054246	3	-0.002
SPCD	300	5054250	1	0.004
SPCD	300	5054250	2	-0.088
SPCD	300	5054250	3	-0.002
SPCD	300	5053650	1	-0.003
SPCD	300	5053650	2	-0.088
SPCD	300	5053650	3	-0.001
SPCD	300	5054362	1	0.043
SPCD	300	5054362	2	-0.088
SPCD	300	5054362	3	0.000
SPCD	300	5054366	1	0.041



SPCD	300	5054366	2	-0.088
SPCD	300	5054366	3	0.000
SPCD	300	5054370	1	0.038
SPCD	300	5054370	2	-0.088
SPCD	300	5054370	3	-0.001
SPCD	300	5054374	1	0.033
SPCD	300	5054374	2	-0.088
SPCD	300	5054374	3	-0.001
SPCD	300	5054378	1	0.028
SPCD	300	5054378	2	-0.088
SPCD	300	5054378	3	-0.001
SPCD	300	5054382	1	0.021
SPCD	300	5054382	2	-0.088
SPCD	300	5054382	3	-0.002
SPCD	300	5054386	1	0.014
SPCD	300	5054386	2	-0.088
SPCD	300	5054386	3	-0.002
SPCD	300	5054390	1	0.005
SPCD	300	5054390	2	-0.088
SPCD	300	5054390	3	-0.002
SPCD	300	5053794	1	-0.003
SPCD	300	5053794	2	-0.088
SPCD	300	5053794	3	-0.002
SPCD	300	5054502	1	0.049
SPCD	300	5054502	2	-0.088
SPCD	300	5054502	3	0.000
SPCD	300	5054506	1	0.047
SPCD	300	5054506	2	-0.088
SPCD	300	5054506	3	0.000
SPCD	300	5054510	1	0.043
SPCD	300	5054510	2	-0.088
SPCD	300	5054510	3	-0.001
SPCD	300	5054514	1	0.038
SPCD	300	5054514	2	-0.088
SPCD	300	5054514	3	-0.001
SPCD	300	5054518	1	0.032
SPCD	300	5054518	2	-0.088
SPCD	300	5054518	3	-0.001
SPCD	300	5054522	1	0.024
SPCD	300	5054522	2	-0.088
SPCD	300	5054522	3	-0.002



SPCD	300	5054526	1	0.016
SPCD	300	5054526	2	-0.088
SPCD	300	5054526	3	-0.002
SPCD	300	5054530	1	0.007
SPCD	300	5054530	2	-0.088
SPCD	300	5054530	3	-0.002
SPCD	300	5053938	1	-0.003
SPCD	300	5053938	2	-0.087
SPCD	300	5053938	3	-0.002
SPCD	300	5053333	1	-0.035
SPCD	300	5053333	2	-0.089
SPCD	300	5053333	3	0.000
SPCD	300	5053474	1	-0.041
SPCD	300	5053474	2	-0.090
SPCD	300	5053474	3	0.000
SPCD	300	5053341	1	-0.033
SPCD	300	5053341	2	-0.089
SPCD	300	5053341	3	0.000
SPCD	300	5053478	1	-0.039
SPCD	300	5053478	2	-0.090
SPCD	300	5053478	3	0.000
SPCD	300	5053349	1	-0.031
SPCD	300	5053349	2	-0.089
SPCD	300	5053349	3	0.000
SPCD	300	5053482	1	-0.036
SPCD	300	5053482	2	-0.089
SPCD	300	5053482	3	0.000
SPCD	300	5053357	1	-0.028
SPCD	300	5053357	2	-0.089
SPCD	300	5053357	3	-0.001
SPCD	300	5053486	1	-0.032
SPCD	300	5053486	2	-0.089
SPCD	300	5053486	3	0.000
SPCD	300	5053365	1	-0.024
SPCD	300	5053365	2	-0.089
SPCD	300	5053365	3	-0.001
SPCD	300	5053490	1	-0.028
SPCD	300	5053490	2	-0.089
SPCD	300	5053490	3	0.000
SPCD	300	5053373	1	-0.019
SPCD	300	5053373	2	-0.089



SPCD	300	5053373	3	-0.001
SPCD	300	5053494	1	-0.022
SPCD	300	5053494	2	-0.088
SPCD	300	5053494	3	-0.001
SPCD	300	5053381	1	-0.014
SPCD	300	5053381	2	-0.088
SPCD	300	5053381	3	-0.001
SPCD	300	5053498	1	-0.016
SPCD	300	5053498	2	-0.088
SPCD	300	5053498	3	-0.001
SPCD	300	5053389	1	-0.009
SPCD	300	5053389	2	-0.088
SPCD	300	5053389	3	-0.001
SPCD	300	5053502	1	-0.010
SPCD	300	5053502	2	-0.088
SPCD	300	5053502	3	-0.001
SPCD	300	5053618	1	-0.047
SPCD	300	5053618	2	-0.091
SPCD	300	5053618	3	0.000
SPCD	300	5053622	1	-0.045
SPCD	300	5053622	2	-0.090
SPCD	300	5053622	3	0.001
SPCD	300	5053626	1	-0.042
SPCD	300	5053626	2	-0.090
SPCD	300	5053626	3	0.001
SPCD	300	5053630	1	-0.037
SPCD	300	5053630	2	-0.089
SPCD	300	5053630	3	0.000
SPCD	300	5053634	1	-0.031
SPCD	300	5053634	2	-0.089
SPCD	300	5053634	3	0.000
SPCD	300	5053638	1	-0.025
SPCD	300	5053638	2	-0.088
SPCD	300	5053638	3	0.000
SPCD	300	5053642	1	-0.018
SPCD	300	5053642	2	-0.088
SPCD	300	5053642	3	-0.001
SPCD	300	5053646	1	-0.011
SPCD	300	5053646	2	-0.088
SPCD	300	5053646	3	-0.001
SPCD	300	5053762	1	-0.053



SPCD	300	5053762	2	-0.091
SPCD	300	5053762	3	0.001
SPCD	300	5053766	1	-0.050
SPCD	300	5053766	2	-0.091
SPCD	300	5053766	3	0.001
SPCD	300	5053770	1	-0.047
SPCD	300	5053770	2	-0.090
SPCD	300	5053770	3	0.001
SPCD	300	5053774	1	-0.041
SPCD	300	5053774	2	-0.089
SPCD	300	5053774	3	0.001
SPCD	300	5053778	1	-0.035
SPCD	300	5053778	2	-0.089
SPCD	300	5053778	3	0.001
SPCD	300	5053782	1	-0.028
SPCD	300	5053782	2	-0.088
SPCD	300	5053782	3	0.000
SPCD	300	5053786	1	-0.020
SPCD	300	5053786	2	-0.088
SPCD	300	5053786	3	-0.001
SPCD	300	5053790	1	-0.011
SPCD	300	5053790	2	-0.088
SPCD	300	5053790	3	-0.001
SPCD	300	5053906	1	-0.059
SPCD	300	5053906	2	-0.091
SPCD	300	5053906	3	0.001
SPCD	300	5053910	1	-0.056
SPCD	300	5053910	2	-0.091
SPCD	300	5053910	3	0.001
SPCD	300	5053914	1	-0.052
SPCD	300	5053914	2	-0.090
SPCD	300	5053914	3	0.001
SPCD	300	5053918	1	-0.046
SPCD	300	5053918	2	-0.089
SPCD	300	5053918	3	0.001
SPCD	300	5053922	1	-0.039
SPCD	300	5053922	2	-0.088
SPCD	300	5053922	3	0.001
SPCD	300	5053926	1	-0.031
SPCD	300	5053926	2	-0.088
SPCD	300	5053926	3	0.000



SPCD	300	5053930	1	-0.022
SPCD	300	5053930	2	-0.087
SPCD	300	5053930	3	0.000
SPCD	300	5053934	1	-0.012
SPCD	300	5053934	2	-0.087
SPCD	300	5053934	3	-0.001



ANEXO VI

TARJETAS NASTRAN SPC1

(DFEM)



Tabla 4. 21: Tarjeta NASTRAN SPC1 para el modelo detallado (DFEM) tabla completa.

Tipo tarjeta	SID	C	Gi
SPC1	654321	123	5000666
SPC1	654321	123	5000670
SPC1	654321	123	5000818
SPC1	654321	123	5000814
SPC1	654321	123	5000674
SPC1	654321	123	5000822
SPC1	654321	123	5000678
SPC1	654321	123	5000826
SPC1	654321	123	5000682
SPC1	654321	123	5000830
SPC1	654321	123	5000686
SPC1	654321	123	5000834
SPC1	654321	123	5000690
SPC1	654321	123	5000838
SPC1	654321	123	5000694
SPC1	654321	123	5000842
SPC1	654321	123	5000698
SPC1	654321	123	5000846
SPC1	654321	123	5000036
SPC1	654321	123	5000184
SPC1	654321	123	5000966
SPC1	654321	123	5000962
SPC1	654321	123	5000970
SPC1	654321	123	5000974
SPC1	654321	123	5000978
SPC1	654321	123	5000982
SPC1	654321	123	5000986
SPC1	654321	123	5000990
SPC1	654321	123	5000994
SPC1	654321	123	5000332
SPC1	654321	123	5000004
SPC1	654321	123	5000000
SPC1	654321	123	5000148
SPC1	654321	123	5000152
SPC1	654321	123	5000008
SPC1	654321	123	5000156
SPC1	654321	123	5000012
SPC1	654321	123	5000160



SPC1	654321	123	5000016
SPC1	654321	123	5000164
SPC1	654321	123	5000020
SPC1	654321	123	5000168
SPC1	654321	123	5000024
SPC1	654321	123	5000172
SPC1	654321	123	5000028
SPC1	654321	123	5000176
SPC1	654321	123	5000032
SPC1	654321	123	5000180
SPC1	654321	123	5000296
SPC1	654321	123	5000300
SPC1	654321	123	5000304
SPC1	654321	123	5000308
SPC1	654321	123	5000312
SPC1	654321	123	5000316
SPC1	654321	123	5000320
SPC1	654321	123	5000324
SPC1	654321	123	5000328
SPC1	654321	123	5001003
SPC1	654321	123	5001151
SPC1	654321	123	5001007
SPC1	654321	123	5001155
SPC1	654321	123	5001011
SPC1	654321	123	5001159
SPC1	654321	123	5001015
SPC1	654321	123	5001163
SPC1	654321	123	5001019
SPC1	654321	123	5001167
SPC1	654321	123	5001023
SPC1	654321	123	5001171
SPC1	654321	123	5001027
SPC1	654321	123	5001175
SPC1	654321	123	5001031
SPC1	654321	123	5001179
SPC1	654321	123	5000369
SPC1	654321	123	5000517
SPC1	654321	123	5001299
SPC1	654321	123	5001303
SPC1	654321	123	5001307
SPC1	654321	123	5001311
SPC1	654321	123	5001315



SPC1	654321	123	5001319
SPC1	654321	123	5001323
SPC1	654321	123	5001327
SPC1	654321	123	5000665
SPC1	654321	123	5000337
SPC1	654321	123	5000485
SPC1	654321	123	5000341
SPC1	654321	123	5000489
SPC1	654321	123	5000345
SPC1	654321	123	5000493
SPC1	654321	123	5000349
SPC1	654321	123	5000497
SPC1	654321	123	5000353
SPC1	654321	123	5000501
SPC1	654321	123	5000357
SPC1	654321	123	5000505
SPC1	654321	123	5000361
SPC1	654321	123	5000509
SPC1	654321	123	5000365
SPC1	654321	123	5000513
SPC1	654321	123	5000633
SPC1	654321	123	5000637
SPC1	654321	123	5000641
SPC1	654321	123	5000645
SPC1	654321	123	5000649
SPC1	654321	123	5000653
SPC1	654321	123	5000657
SPC1	654321	123	5000661
SPC1	654321	123	5052716
SPC1	654321	123	5052723
SPC1	654321	123	5052863
SPC1	654321	123	5052859
SPC1	654321	123	5052731
SPC1	654321	123	5052867
SPC1	654321	123	5052739
SPC1	654321	123	5052871
SPC1	654321	123	5052747
SPC1	654321	123	5052875
SPC1	654321	123	5052755
SPC1	654321	123	5052879
SPC1	654321	123	5052763
SPC1	654321	123	5052883



SPC1	654321	123	5052771
SPC1	654321	123	5052887
SPC1	654321	123	5052779
SPC1	654321	123	5052891
SPC1	654321	123	5052158
SPC1	654321	123	5052270
SPC1	654321	123	5053007
SPC1	654321	123	5053003
SPC1	654321	123	5053011
SPC1	654321	123	5053015
SPC1	654321	123	5053019
SPC1	654321	123	5053023
SPC1	654321	123	5053027
SPC1	654321	123	5053031
SPC1	654321	123	5053035
SPC1	654321	123	5052418
SPC1	654321	123	5053151
SPC1	654321	123	5053147
SPC1	654321	123	5053155
SPC1	654321	123	5053159
SPC1	654321	123	5053163
SPC1	654321	123	5053167
SPC1	654321	123	5053171
SPC1	654321	123	5053175
SPC1	654321	123	5053179
SPC1	654321	123	5052566
SPC1	654321	123	5053295
SPC1	654321	123	5053291
SPC1	654321	123	5053299
SPC1	654321	123	5053303
SPC1	654321	123	5053307
SPC1	654321	123	5053311
SPC1	654321	123	5053315
SPC1	654321	123	5053319
SPC1	654321	123	5053323
SPC1	654321	123	5052714
SPC1	654321	123	5052094
SPC1	654321	123	5052086
SPC1	654321	123	5052235
SPC1	654321	123	5052238
SPC1	654321	123	5052102
SPC1	654321	123	5052242



SPC1	654321	123	5052110
SPC1	654321	123	5052246
SPC1	654321	123	5052118
SPC1	654321	123	5052250
SPC1	654321	123	5052126
SPC1	654321	123	5052254
SPC1	654321	123	5052134
SPC1	654321	123	5052258
SPC1	654321	123	5052142
SPC1	654321	123	5052262
SPC1	654321	123	5052150
SPC1	654321	123	5052266
SPC1	654321	123	5052383
SPC1	654321	123	5052386
SPC1	654321	123	5052390
SPC1	654321	123	5052394
SPC1	654321	123	5052398
SPC1	654321	123	5052402
SPC1	654321	123	5052406
SPC1	654321	123	5052410
SPC1	654321	123	5052414
SPC1	654321	123	5052531
SPC1	654321	123	5052534
SPC1	654321	123	5052538
SPC1	654321	123	5052542
SPC1	654321	123	5052546
SPC1	654321	123	5052550
SPC1	654321	123	5052554
SPC1	654321	123	5052558
SPC1	654321	123	5052562
SPC1	654321	123	5052679
SPC1	654321	123	5052682
SPC1	654321	123	5052686
SPC1	654321	123	5052690
SPC1	654321	123	5052694
SPC1	654321	123	5052698
SPC1	654321	123	5052702
SPC1	654321	123	5052706
SPC1	654321	123	5052710
SPC1	654321	123	5053945
SPC1	654321	123	5054082
SPC1	654321	123	5053953



SPC1	654321	123	5054086
SPC1	654321	123	5053961
SPC1	654321	123	5054090
SPC1	654321	123	5053969
SPC1	654321	123	5054094
SPC1	654321	123	5053977
SPC1	654321	123	5054098
SPC1	654321	123	5053985
SPC1	654321	123	5054102
SPC1	654321	123	5053993
SPC1	654321	123	5054106
SPC1	654321	123	5054001
SPC1	654321	123	5054110
SPC1	654321	123	5053397
SPC1	654321	123	5053506
SPC1	654321	123	5054222
SPC1	654321	123	5054226
SPC1	654321	123	5054230
SPC1	654321	123	5054234
SPC1	654321	123	5054238
SPC1	654321	123	5054242
SPC1	654321	123	5054246
SPC1	654321	123	5054250
SPC1	654321	123	5053650
SPC1	654321	123	5054362
SPC1	654321	123	5054366
SPC1	654321	123	5054370
SPC1	654321	123	5054374
SPC1	654321	123	5054378
SPC1	654321	123	5054382
SPC1	654321	123	5054386
SPC1	654321	123	5054390
SPC1	654321	123	5053794
SPC1	654321	123	5054502
SPC1	654321	123	5054506
SPC1	654321	123	5054510
SPC1	654321	123	5054514
SPC1	654321	123	5054518
SPC1	654321	123	5054522
SPC1	654321	123	5054526
SPC1	654321	123	5054530
SPC1	654321	123	5053938



SPC1	654321	123	5053333
SPC1	654321	123	5053474
SPC1	654321	123	5053341
SPC1	654321	123	5053478
SPC1	654321	123	5053349
SPC1	654321	123	5053482
SPC1	654321	123	5053357
SPC1	654321	123	5053486
SPC1	654321	123	5053365
SPC1	654321	123	5053490
SPC1	654321	123	5053373
SPC1	654321	123	5053494
SPC1	654321	123	5053381
SPC1	654321	123	5053498
SPC1	654321	123	5053389
SPC1	654321	123	5053502
SPC1	654321	123	5053618
SPC1	654321	123	5053622
SPC1	654321	123	5053626
SPC1	654321	123	5053630
SPC1	654321	123	5053634
SPC1	654321	123	5053638
SPC1	654321	123	5053642
SPC1	654321	123	5053646
SPC1	654321	123	5053762
SPC1	654321	123	5053766
SPC1	654321	123	5053770
SPC1	654321	123	5053774
SPC1	654321	123	5053778
SPC1	654321	123	5053782
SPC1	654321	123	5053786
SPC1	654321	123	5053790
SPC1	654321	123	5053906
SPC1	654321	123	5053910
SPC1	654321	123	5053914
SPC1	654321	123	5053918
SPC1	654321	123	5053922
SPC1	654321	123	5053926
SPC1	654321	123	5053930
SPC1	654321	123	5053934